د. عمّـار ياسين منصور

النَّقلُ العَصبيُّ

The Neural Conduction in Neural Fibers

مُقاربةٌ شخصيَّةٌ لآليَّةِ النَّقلِ العصبيّ عبرَ المحاورِ العصبيَّةِ

Personal View vs. International View

N.B.

To read the English version of this article, click on the following link:

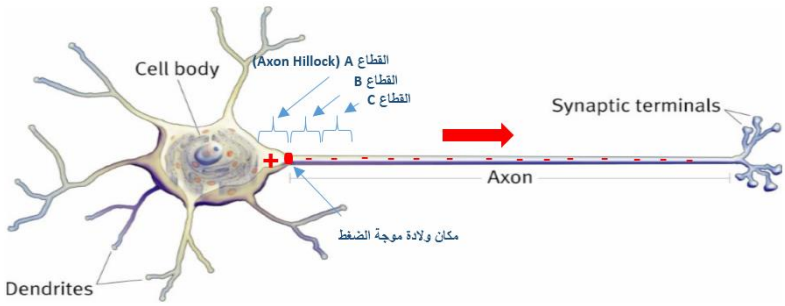
The Neural Conduction in Neural Fiber (Personal View)

النَّقلُ العصبيُّ الـ Neural Conduction العابرُ لمُكوّناتِ العُصبونِ الـ Neuron مِنْ جهةٍ، والعابرُ لسطوحِ المُشافهةِ أو ما يُسمى بالمشابكِ العصبيَّةِ الـ Synapses مِنْ جهةٍ ثانيةٍ، عمليَّةٌ دقيقةٌ معقَّدةٌ استفزَّتْ عبرَ الزَّمنِ العقلَ والخيالَ معاً. جادتْ علينا العبقريَّاتُ بالكثيرِ مِنَ الفرضيَّاتِ لمْ يتحمَّلْ معظمُها وطأةَ النَّقدِ العلميّ والتَّجريبيّ. وأمَّا الثَّابتُ منها والذي يلقى في زمننِا قبولاً علميَّاً وعالميَّاً فما زالَ بنظري يفتقدُ إلى الكفاءةِ في سرعةِ التَّوصيلِ، كما المرونةِ في التَّنفيذِ، عدا عنْ كونه فاقداً للسَّلاسةِ المُفترضةِ في عمليَّةِ خلقٍ بديعٍ كهذا.

سأبدأُ مقالتي بتشريحِ نظريَّةِ النَّقلِ العصبيّ عبرَ المحورِ العصبيّ للعصبونِ ممَّا اعتادَ باحثو زماننا ترويجاً. بعدَها، أعلنُ فرضيَّةَ النَّقلِ العصبيّ خاصَّتي مُتمنِّياً أنْ يتمدَّدَ صدرُ القارئينَ قبلَ خيالِهم لقبولِ الجديدِ المُحدَثِ.

تتحاورُ العصبوناتُ، وتتبادلُ باستمرارٍ الرَّسائلَ فيما بينَها. يتلقَّى العصبونُ الواردَ مِنَ الرَّسائلِ إمَّا مباشرةً بجسمهِ الـ Soma، أو باستطالاتِه القصيرةِ الـ Dendrites، ونادراً بمحورهِ العصبيّ الـ Axon. بالمقابلِ، يُصدِّرُ العصبونُ رسائلَهُ العصبيَّةَ إلى وجهتِها الهدفِ عبرَ محورهِ العصبيّ.

ينتهي المحورُ العصبيُّ في مشابكَ عصبيَّةٍ يختلفُ موقعُها باختلافِ الهدف. الهدفُ قدْ يكونُ عصبوناتٍ أخرى، وقدْ يكونُ كينوناتٍ أخرى ممَّا يزخرُ بهِ الجسمُ البشريُّ. المسافةُ بينَ موقعِ القرار، أيْ جسمِ العصبونِ، والعضوِ الهدفِ الـ Effector Organ طويلةٌ نسبيَّاً قدْ تصلُ إلى مترٍ تقريباً وقدْ تتعدَّاهُ في أحايينَ كثيرةٍ. تعبرُ الرّسالةُ العصبيَّةُ المحورَ العصبيَّ بسرعةٍ كبيرةٍ لتصلَ غايتَها في نهايةِ المطافِ؛ **انظرِ الشَّكلَ (١).**



الشَّكل (١) النَّقلُ في اللِّيفِ العصبيّ
The Neural Conduction In Neural Fiber

يتألَّفُ العصبونُ الـ Neuron مِنْ جسمِ الخليَّةِ الـ Cell Body (Soma)،
ومِنْ عددٍ مِنَ الاستطالاتِ القصيرةِ الـ Dendrites، ومِنْ محورِ الـ Axon وحيدٍ على الأغلبِ.

لزمنٍ طويلٍ، اعتُبرتْ منطقةُ التَّذخيرِ الـ Axon Hillock مكانَ ولادةِ موجةِ النَّقلِ العصبيّ.
بينَما تقولُ الدِّراساتُ الحديثةُ بولادةِ موجةِ النَّقلِ العصبيّ في مكانٍ أبعدَ مِنْ ذلكَ بقليلٍ، عندَ الحدودِ الفاصلةِ
ما بينَ منطقةِ التَّذخير (القطاعُ A) وبدايةِ المحورِ العصبيّ (القطاعُ B).
شخصيَّاً أعتقدُ الأمرَ ذاتَه،
معَ التَّأكيدِ على جوهريَّةِ الخلافِ بينَ فرضيَّتي وتلكَ السَّائدةِ حاليَّاً.. كما سأشرحُ لاحقاً.

النَّقلُ العصبيُّ في الألياف العصبيَّةِ (الفرضيَّةُ الحاليَّةُ)
The Neural conduction (International View)

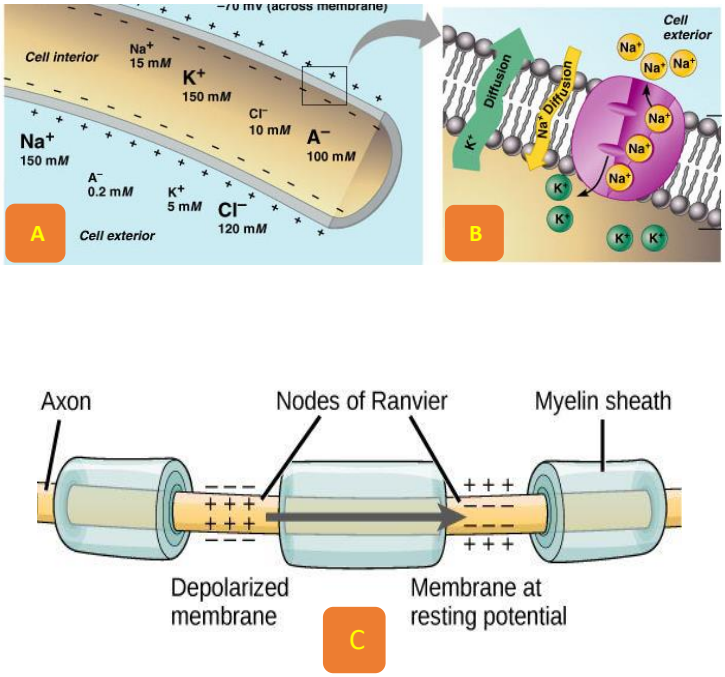
يخضعُ عملُ العصبونِ الحركيّ إلى قانونِ الكلِّ أو اللَّاشيءِ الـ All-or-None Law. فقدْ يحدثُ أنْ تجمَّعتْ في جسمِ العصبونِ مُحفِّزاتُ القرار. وبلغَ التَّحفيزُ عتبةَ الأمرِ الـ Threshold. تتبلَّغُ منطقةُ التَّذخيرِ الـ Axon Hillock الأمرَ على شكلِ شحنةٍ كهربيَّةٍ موجبةٍ مُحدَّدةِ القيمةِ؛ ***انظرِ الشَّكلَ (١).***

في منطقةِ التَّذخير، تعملُ الطَّاقةُ الوافدةُ على تفعيلِ بوَّاباتٍ جداريَّةٍ خاصَّةٍ نوعيَّةٍ لشاردةِ الصُّوديومِ الـ Voltage gated Na^+ channels. تسمحُ هذهِ البوَّاباتُ بتدفُّقِ شاردةِ الصُّوديومِ الموجبةِ داخلَ منطقةِ التَّذخير ممَّا يعني مزيداً مِنَ الإيجابيَّةِ داخلَها، وهذا ما يُعرفُ اصطلاحاً بزوالِ القطبيَّةِ الـ Depolarization. يُحدِثُ ذلكَ خللاً في الشِّحنةِ الكهربيَّةِ بينَ داخلِ المحورِ العصبيّ وخارجِه لصالحِ الدَّاخلِ، وهذا ما نُسمِّيهِ بكمونِ العملِ الـ Action Potential. ولادةُ هذا الأخيرِ هوَ الإعلانُ عنِ انطلاقِ عمليَّةِ النَّقلِ العصبيّ في المحورِ العصبيّ.

ثمَّ يحدثُ أنْ تبلغَ إيجابيَّةُ الدَّاخلِ حدَّاً أعظميَّاً تتفعَّلُ معهُ بوَّاباتٌ جداريَّةٌ أخرى نوعيَّةٌ لشاردةِ البوتاسيومِ الموجبةِ الـ Voltage gated K^+ channels. تطردُ هذهِ البوَّاباتُ البوتاسيومَ خارجَ المحورِ العصبيّ ممَّا يعني خفضاً في إيجابيةِ الدَّاخلِ، أيْ اصطلاحاً عودةَ القطبيَّةِ الـ Repolarization. عمليَّةُ إعادةِ القطبيَّةِ تعودُ بشحنةِ الدَّاخلِ إلى قيمتِه الأساس السَّالبةِ، وهوَ ما يُعرفُ اصطلاحاً بكمونِ الرَّاحةِ الـ Resting Potential. تجتاحُ عمليَّةُ إزالةِ الاستقطابِ ومِنْ ثُمَّ عودتِه خطِّيَّاً جدارَ المحورِ العصبيّ نقطةً بنقطةٍ حتَّى تبلغَ مُنتهاها في المشبكِ العصبيّ.

عمليَّاً، مرحلةٌ عابرةٌ مِنْ فرطِ الاستقطابِ الكهربائيّ الـ Hyperpolarization تسبقُ كمونَ الرَّاحةِ نُرجعُها إلى التَّدفُّقِ الزَّائدِ لشاردةِ البوتاسيوم K^+ خارجَ المحور العصبيّ. بعدَها، سريعاً ما يعودُ التَّوازنُ فتعودُ لكمونِ الرَّاحةِ قيمتُهُ الأساس.

بكلماتٍ أُخرى، انقلابُ فرقِ الكمونِ نحوَ الإيجابيَّةِ أيْ إزالةُ الاستقطابِ على جانبيّ الغشاءِ الخلويّ للمحور العصبيّ، وانطلاقُ هذهِ العمليَّةِ بصورةٍ خطِّيَّةٍ مِنْ قطعةٍ جداريَّةٍ إلى أخرى مجاورةٍ لها مباشرةً، يُشكِّلانِ الأساسَ لتيَّارِ النَّقلِ العصبيّ العابرِ لجدارِ المحور العصبيّ؛ **انظرِ الشَّكلَ (٢)**.



الشَّكل (٢)
النَّقلُ العصبيُّ في المحورِ العصبيّ (النَّظريَّةُ الحاليَّة)
Neural Conduction in Axon (International View)

حركيَّةُ الشَّواردِ الموجبةِ الـ Na^+ والـ K^+ بينَ الدَّاخلِ والخارجِ هيَ الأساسُ في عمليَّةِ النَّقلِ عبرَ المحورِ العصبيّ.
أثناءَ الرَّاحةِ يسيطرُ كمونُ الرَّاحةِ بقيمتِهِ السَّالبةِ على جانبي جدارِ المحور العصبيّ؛ **انظرِ الشَّكلَ (A)**.

عندَ بدءِ التَّفعيل، وبلوغِ عتبةِ الأمرِ الـThreshold في القطاعِ (A)، تتدفَّقُ شاردةُ Na^+ إلى الدَّاخلِ لتُعلنَ انقلابَ الشَّحنةِ وبناءَ كمونِ العملِ في هذا القطاعِ مِنَ المحورِ العصبيّ.
وفي الجوارِ المباشرِ للسَّابقِ (القطاعُ B) تكونُ الشَّحنةُ موجبةً كفايةً لتفعيلِ بوَّاباتِ أقنيةِ شاردةِ الصُّوديوم.
ممَّا يعني تدفُّقاً لشاردةِ الصُّوديوم Na^+ إلى الدَّاخلِ الخلويّ، وتالياً بناءَ كمونِ عملٍ جديد؛ **انظرِ الشَّكلَ (١)**.
وهكذا دواليكَ، وبتغذيةٍ ذاتيَّةٍ ينتقلُ كمونُ العملِ باتِّجاهِ الهدفِ خطِّيَّاً على طولِ المحورِ العصبيّ؛ **الشكل (C)**.

العودةُ إلى نقطةِ البداية أيْ إلى كمونِ الرَّاحةِ، **واستعادةُ** المحورِ العصبيّ القدرةَ على عمليَّةِ نقلٍ جديدة، مرهونتان بكفاءةِ مضخَّاتِ الصُّوديوم والبوتاسيوم الـ Na^+/K^+ Pump.
هيَ مضخَّاتٌ جداريَّةٌ مستهلكةٌ للطَّاقةِ مِنْ وحداتِ الـ ATP. تعملُ الواحدةُ منها على طرحِ ثلاثِ شاراتٍ مِنَ الصُّوديوم وإدخالِ اثنيتنِ مِنَ البوتاسيوم، والثَّمنُ جزيئةٌ واحدةٌ مِنَ الـ ATP؛ **الشَّكل (B)**.

مِنَ المناسبِ هنا الإشارةُ إلى عمليَّةِ الهروبِ المستمرِّ لشاردتي Na^+ والـ K^+ عبرَ جدارِ المحورِ العصبيّ.
اختلافُ تركيزِ الشَّواردِ على جانبيّ الجدارِ هوَ المُبرِّرُ لعمليَّاتِ التَّسريبِ هذه. شاردةُ الصُّوديومِ هيَ شاردةٌ خارجُ خلويَّةٍ

أساساً، بينما شاردةُ البوتاسيومِ تتجمَّعُ بتراكيزَ عاليةٍ داخلَها. مضخَّاتُ الصُّوديومِ والبوتاسيومِ كفيلةٌ بإعادةِ التَّوازنِ والمحافظةِ على كمونِ الرَّاحةِ.

المفهومُ الحديثُ لآليَّةِ النَّقلِ في اللِّيفِ العصبيِّ
(مفهومٌ شخصيٌّ)
The Neural Conduction in Neural Fiber
(Innovated Conception)

أوَّلاً، شخصيَّاً أرى النَّقلَ العصبيَّ الـ Neural Conduction في اللِّيفِ العصبيِّ الـ Neural Fiber موجةَ ضغطٍ الـ Pressure Wave تسري ضمنَ اللُّمعةِ وفي المركزِ تحديداً. بينما أراهُ في المشابكِ العصبيَّةِ فعلاً كهربائيَّاً يجتاحُ الشقَّ المشبكيَّ الـ Synaptic Cleft. وبذلكَ، تصبحُ عمليَّةُ النَّقلِ العصبيِّ في المفهومِ الجديدِ الذي أجتهدُ في بيانِ تفصيلِهِ ثلاثيَّةَ الطَّور. تكونُ الكهرباءُ أساسَ الطَّورينِ الأوَّلِ والثَّالثِ، وتكونُ موجةُ الضَّغطِ هيَ الأساسَ في الطَّورِ الثَّاني الأوسطِ.

ففي المشبكِ العصبيِّ الـ Synapse، يكونُ الشَّقُّ المشبكيُّ الـ Synaptic Cleft ويكونُ الفراغُ. وفي هكذا خلاء، يصبحُ ضياعُ موجةِ الضَّغطِ قدراً مَحتوماً لا تصريفَ فيه. فلا تجدُ العضويَّةُ الحيَّةُ، والحالةُ هذهِ، فكاكاً مِنَ الكهرباءِ مِنْ أجلِ عبورِ الإشارةِ العصبيَّةِ إلى الضَّفَّةِ الأخرى مِنَ الشَّقِّ المِشبكيِّ.. وهذا بالضَّبطِ ما كان.

بالمقابلِ، تسمحُ بنيةُ اللِّيفِ العصبيِّ مُحكمةُ الإغلاقِ بالانتشارِ الآمنِ لموجاتِ الضَّغطِ. لذلكَ مَكراً منها ودهاءً، استخدمتِ العضويَّةُ هذهِ الموجاتِ رَكوباً لعمليَّةِ النَّقلِ العصبيِّ عبرَ أليافِها العصبيَّةِ. فموجةُ الضَّغطِ هذهِ أكثرُ أماناً على بنيةِ اللِّيفِ العصبيِّ، مِنْ جهةٍ. وهيَ أسهلُ بناءً وأيسرُ استخداماً، مِنْ جهةٍ ثانية.

مُلاحظةٌ:

شرحتُ تفصيلَ الأطوارِ الثَّلاثةِ لعمليَّةِ النَّقلِ العصبيِّ في مقالٍ وفيديو خاصَّين، تجدونَ الرَّابطَ لكليهما فيما يلي:
الأطوارُ الثَّلاثةُ للنَّقلِ العصبيِّ

ثانياً، في اللِّيفِ العصبيِّ، يُختصرُ دورُ التَّيَّارِ الكهربائيِّ في رفعِ كفاءةِ وسطِ انتشارِ موجةِ الضَّغطِ العاملةِ زيادةً في سرعةِ انتشارِ هذهِ الأخيرةِ مِنْ جهةٍ، وتقليلاً مِنْ ضياعِ طاقتِها مِنْ جهةٍ أخرى؛ **انظرِ الشَّكلَ (٨).**

بينما في المِشبكِ العصبيِّ الـ Neural Synapse، تكتفي موجةُ الضَّغطِ العاملةُ ببناءِ القطبِ الموجبِ الـ Cathode لتيَّارِ النَّقلِ الكهربائيِّ. على أنْ يمتلكَ هذا الأخيرُ حصريَّةَ نقلِ الإشارةِ العصبيَّةِ إلى العضوِ الهدفِ ما بعدَ المشبكِ الـ Postsynaptic Effector Organ؛ **انظرِ الشَّكلَ (٧-B).**

ثالثاً، أرى وجودَ نوعينِ مِنَ التَّيَّاراتِ الكهربائيَّةِ الوظيفيَّةِ خلالَ عمليَّةِ النَّقلِ العصبيِّ في اللِّيفِ العصبيِّ. فهناكَ تيَّارُ النَّقلِ الكهربائيُّ بالخاصَّةِ وهوَ التَّيَّارُ الكهربائيُّ الانتهائيُّ الـ Terminal Electrical Current (TEC)، وهناكَ التَّيَّاراتُ الكهربائيَّةُ الوسيطةُ، أمِ الوسطيَّةُ

لا فرقَ، وهيَ التَّيَّاراتُ القِطعيَّةُ الـ Segmental Electrical Currents (SECs). نضيفُ إلى هذهِ الأخيرةِ تيَّارَ النَّقلِ الكهربائيَّ الأوَّليَّ الـ Preliminary Electrical Current. هوَ شبيهٌ بالتَّيَّاراتِ القِطعيَّةِ مِنْ حيثُ الوظيفةِ، لكنَّهُ يختلفُ عنها بالشِّدَّةِ فقط ممَّا اقتضى التَّخصيصَ.

فأمَّا التَّيَّارُ الكهربائيُّ الانتهائيُّ فوحيدٌ خلالَ عمليَّةِ النَّقلِ الواحدةِ. وهوَ الفاعلُ أساساً حينَ النَّقلِ عبرَ المشابكِ العصبيَّةِ؛ **انظرِ الشَّكلَ (٧-B)**. وأمَّا التَّيَّاراتُ القِطعيَّةُ فعديدةٌ بعددِ القطعِ بينَ عقدتينِ للمحورِ العصبيِّ. هيَ المُسَرّعاتُ لموجةِ الضَّغطِ العاملةِ حينَ انتشارها عبرَ كثيرِ القِطعِ بينَ عقدتَينِ الـ Internodal Segments مِنَ اللِّيفِ العصبيِّ. كلُّ تيَّارٍ قِطعيٍّ يهتمُّ بشؤونِ موجةِ الضَّغطِ العاملةِ في قِطعتهِ الخاصَّةِ بهِ؛ **انظرِ الشَّكلَ (٧-A)**.

ورابعاً، بناءُ كمونِ العملِ الـ Action Potential يبدأُ بارتفاعٍ مفاجئٍ في قيمةِ الضَّغطِ الحلوليِّ الـ Hydrostatic Pressure داخلَ منطقةِ التَّذخيرِ الـ Trigger Zone، والتي توافقُ تشريحيَّاً الـ Axon Hillock. تجتاحُ نبضةُ الضَّغطِ الـ Pressure Impulse الوليدةُ المحورَ العصبيَّ وتكونُ تحتَ مُسمَّى موجةِ الضَّغطِ العاملةِ الـ Action Pressure Wave (APW). يتأسَّسُ كمونُ العملِ بينَ ضفَّتي موجةِ الضَّغطِ العاملةِ داخلَ المحورِ العصبيِّ، لا بينَ داخلٍ وخارجِ الجدارِ كما يدَّعي السَّابقون. ويكونُ هوَ الأساسَ لولادةِ التَّيَّاراتِ الكهربائيَّةِ القِطعيَّةِ العاملةِ (SECs)؛ **انظرِ الشَّكلَ (٥)**.

هيَ الفروقُ الجوهريَّةُ بينَ فرضيَّتي في النَّقلِ العصبيِّ وتلكَ الرَّائجةِ عالميَّاً. هيَ العناوينُ العريضةُ لما ذهبتُ إليهِ مِنْ جديدٍ مُحدَثٍ في آليَّةِ النَّقلِ العصبيِّ. وفيما يلي سيكونُ تشريحُ كلِّ مرحلةٍ منها مُوضِّحاً مُبرّراتِ الحدوثِ وعناصرِ قوَّتِها التَّفضيليَّةِ على النَّظريَّةِ السَّائدةِ حاليَّاً.

١ ـ موجةُ الضَّغطِ العاملةُ The Action Pressure Wave

١-١ ضغطُ الرَّاحةِ The Resting Pressure

يُشكِّلُ العصبونُ الـ Neuron باستطالاتهِ القصيرةِ ومحورهِ العصبيِّ نظاماً أنبوبيَّاً مُحكمَ الإغلاقِ. يمتلئُ هذا النِّظامُ المغلقُ بالبلاسما الـ Cytoplasm ذاتِ الطَّبيعةِ السَّائلةِ والعناصرِ المتنوّعةِ. في حالةِ الرَّاحةِ، يبني العصبونُ داخلَه ضغطاً مرتفعاً نسبيَّاً نُسمّيه اصطلاحاً ضغطَ الرَّاحةِ الـ Resting Pressure. تتحدَّدُ قيمةُ ضغطِ الرَّاحةِ بكتلةِ المادةِ في وحدةِ الحجمِ مِنَ البلاسما. بذلكَ، يسهلُ علينا كشفُ العلاقةِ الطَّرديَّةِ بينَ ضغطِ الرَّاحةِ وكثافةِ البلاسما الخلويَّةِ الـ Cytoplasmic Density.

لضغطِ الرَّاحةِ هذا أهميَّةٌ قصوى. فهو يُحافظُ على لمعةِ الـ Lumen البُنى التَّشريحيَّةِ النَّاقلةِ للأمرِ العصبيِّ. ويضمنُ حريَّةَ المِلاحةِ والنَّقلِ داخلَها. أكثرَ مِنْ ذلكَ، تُحدِّدُ قيمتُهُ سرعةَ موجةِ ضغطِ العملِ العابرةِ لها، وتالياً سرعةَ النَّقلِ العصبيِّ فيها.

فصلُ الكلامِ، لا بدَّ مِنْ بُنيةٍ تحتيَّةٍ متينةٍ لإطلاقِ عمليَّةِ النَّقلِ العصبيِّ عبرَ الألياف العصبيَّةِ. والبُنيةُ هذهِ تكونُ في بناءِ ضغطٍ مُرتفعٍ داخلَ اللِّيفِ العصبيِّ وهوَ في حالةِ الرَّاحةِ. إذ لا يمكنُ للمحورِ العصبيِّ ابتناءُ ضغوطِ عملٍ كبيرةٍ، وتالياً سرعاتِ نقلٍ كبيرةٍ، دونَ قيمٍ عاليةٍ نسبيَّاً مِنْ ضغطِ الرَّاحةِ.. وهذا ما تقرُّهُ العلومُ التَّطبيقيَّةِ.

قراءةُ التَّطبيقاتِ العمليَّةِ لأهميَّةِ ضغطِ الرَّاحةِ المرتفعِ داخلَ البُنى العصبيَّةِ، ولأثرِهِ العظيمِ على استمرارِ النَّوعِ الحيوانيّ إجمالاً، هيَ أكثرُ مِنْ أنْ تُحصى. عندَ الحبَّارِ الـ Squid مثلاً، حيثُ الخطرُ داهمٌ أبداً يهدِّدُ بقاءَ النَّوعِ، نجدُ قيماً أكبرَ لضغوطِ الرَّاحةِ كما قيماً أكبرَ لقطرِ المحاورِ العصبيَّةِ مقارنةً بقيمِها عندَ الإنسان.. وهوَ ما سنرى مَفاعيلَهُ تَفصيلاً فلا أتعجَّلُ.

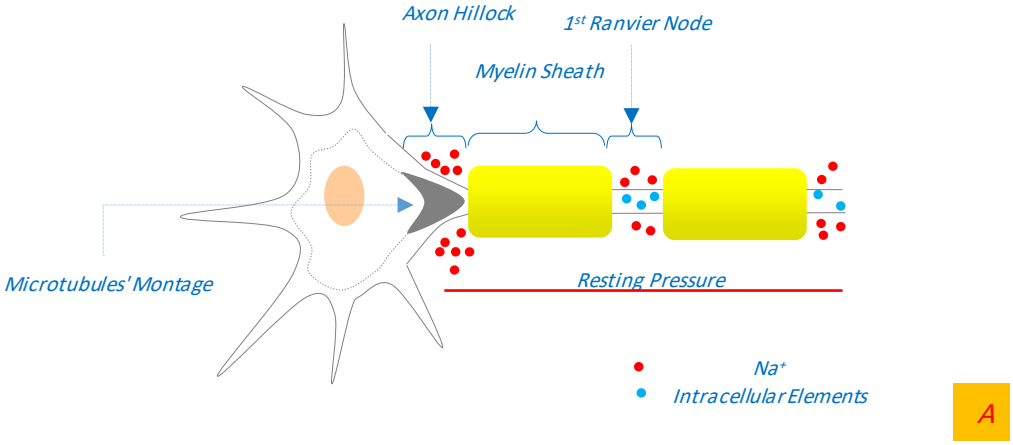
لمزيدٍ مِنَ التَّفصيلِ في التَّشريحِ الوظيفيّ للمحورِ العصبيّ الحركيّ، شاهدِ الفيديو المُلحقَ على هذا الرَّابط:

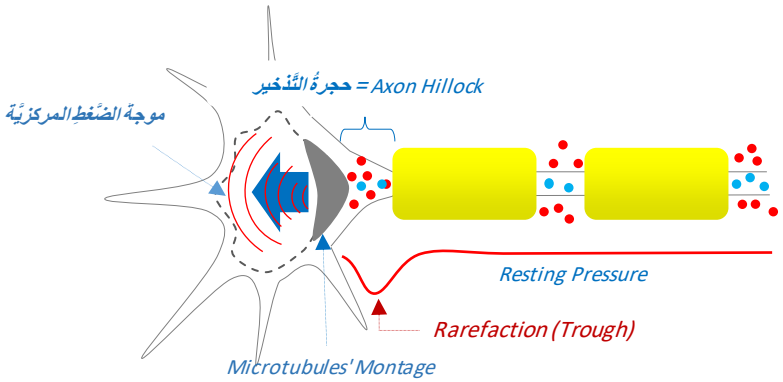
٣-١ موجةُ الضَّغطِ المركزيَّةُ The Central Pressure Wave
وولادةُ موجةِ ضغطِ العملِ The Action Pressure Wave (APW)

متى بلغَ التَّنبيهُ عتبةَ الفعلِ، أحدثَ تقلُّصاً مفاجئاً في التَّشكيلِ الأنبوبيّ الـ Microtubules' Montage الشَّاغلِ لمنطقةِ التَّذخيرِ الـ Axon Hillock؛ **انظرِ الشَّكلَ (٣- A)**. تقلُّصُ الأنابيبِ المجهريَّةِ، وانسحابُ كتلتِها العنيفُ داخلَ جسمِ العصبون، يولِّدُ موجةَ الضَّغطِ المركزيَّةَ الـ Central Pressure Wave أو الجسميَّةَ الـ Somatic Pressure Wave نسبةً إلى جسمِ العصبونِ الـ Soma.. سمِّها ما شئتَ، لا فرقَ. فالاسمانِ هما للشَّيءِ ذاتِهِ.

تجتاحُ موجةُ الضَّغطِ المركزيَّةُ هذهِ جسمَ الخليَّةِ العصبيَّةِ وصولاً إلى الغشاءِ الخلويّ؛ **انظرِ الشَّكلَ (٣- B)**. الغشاءُ الخلويُّ لجسمِ العصبونِ الحركيّ مرنٌ مقاومٌ لتبدُّلاتِ الضَّغطِ الدَّاخليَّةِ بفضلِ أقواسِهِ المفتوحةِ على الخارجِ الخلويّ وبفضلِ شبكةِ الأليافِ المجهريَّةِ المُستبطنةِ لهُ كذلك. فمتى وصلتْ إليهِ موجةُ الضَّغطِ المركزيَّةُ ردَّها على أعقابِها، فتعودُ الأخيرةُ إلى حيثُ هيَ انطلقتْ أساساً.. تعودُ إلى منطقةِ التَّذخير؛ **انظرِ الشَّكلَ (٣- C)**.

بدورِها، وعندَ وصولِها إلى منطقةِ التَّذخير، تصطدمُ الموجةُ الارتداديَّةُ بكتلةِ الأنابيبِ المجهريَّةِ المُنسحبةِ خارجَ منطقتِها. هوَ اصطدامٌ عنيفٌ سيعيدُ التَّشكيلَ الأنبوبيَّ بقوَّةٍ إلى مكانِهِ الأصليّ عندَ بدايةِ المحورِ العصبيّ. تقلُّصُ وانسحابُ كتلةِ الأنابيبِ المجهريَّةِ، ومِنْ ثمَّ تمدُّدُها وعودتُها القويَّةُ إلى حالتِها الأولى، سيُطلقُ موجةَ ضغطِ العملِ الـ Action Pressure Wave. تنتشرُ موجةُ الضَّغطِ العاملةُ داخلَ المحورِ العصبيّ حتَّى تصلَ غايتَها في المشبكِ العصبيّ؛ **انظرِ الشَّكلَ (٣)**.





الشَّكل (٣)
موجةُ الضَّغطِ المركزيَّةُ مقدمةٌ لإطلاقِ موجةِ العملِ

يشكِّلُ الغشاءُ الخلويُّ لجسمِ العصبونِ الحركيِّ الـ Motor Neuron جداراً مقاوماً لتبدُّلاتِ قيمِ الضَّغطِ داخلَه. شكلُ الغلافِ الخلويِّ، نَجمِيُّ الشَّكلِ مع أضلاعِهِ المفتوحةِ نحوَ الخارجِ، ترفعُ مِنْ كفاءتِه حيالَ تذبذباتِ قيمِ الضَّغطِ الدَّاخليَّةِ. إضافةً لذلكَ، تعملُ الأنابيبُ المجهريَّةُ الـ Microtubules، في قسمِها المبطِّنِ للغلافِ، كمصدرٍ أوليٍّ لموجاتِ الضَّغطِ المركزيَّةِ.

الشَّكلُ (B) مرحلةُ التَّذخيرِ وإطلاقِ موجةِ الضَّغطِ المركزيَّةِ: بعدَ وصولِ التَّنبيهِ إليها، تتقلَّصُ كتلةُ الأنابيبِ المجهريَّةِ في منطقةِ الـ Axon Hillock وتنسحبُ داخلَ جسمِ العصبونِ. تنشأُ بذلكَ موجةُ ضغطٍ مركزيَّةٌ (السَّهمُ الأزرقُ) تنتشرُ باتِّجاهِ الغلافِ الخلويِّ لجسمِ العصبونِ. يعملُ الغلافُ الخلويُّ والأنابيبُ المجهريَّةُ المستبطنةُ لهُ على ردِّ موجةِ الضَّغطِ. الموجةُ الارتداديَّةُ هذهِ هيَ الأساسُ في إطلاقِ موجةِ ضغطِ العملِ داخلَ المحورِ العصبيِّ.

الشَّكلُ (C) مرحلةُ الإطلاقِ وولادةُ موجةِ ضغطِ العملِ: تتلقَّى كتلةُ الأنابيبِ المجهريَّةِ الـ Microtubules' Montage في منطقةِ الـ Axon Hillock الموجةَ الارتداديَّةَ (السَّهمُ الأخضرُ) فتندفعُ محيطيّاً مطلقةً بذلكَ موجةِ ضغطِ العملِ (السَّهمُ الأحمر).

لمزيدٍ مِنَ التَّفصيلِ في موجةِ الضَّغطِ المركزيَّةِ، شاهدِ الفيديو المُلحقَ على هذا الرَّابطِ:

١-٣ موجةُ ضغطِ العملِ الأوَّليَّةُ The Preliminary Action Pressure Wave
وموجةُ ضغطِ العملِ القياسيَّةُ The Standard Action Pressure Wave

تبدأ موجةُ ضغطِ العملِ بمناسيبَ مُبالغٍ فيها لا تتوافقُ مع حاجةِ النَّقلِ العصبيّ مِنْ جهةٍ، ولا تنسجمُ مع شروطِ السَّلامةِ للبُنى التَّشريحيَّةِ مِنْ جهةٍ أخرى. كما وقدْ تأخذُ الموجةُ بدايةً مساراً عشوائيّاً واسعاً نسبيّاً. يمكنُ لهُ أنْ يحتلَّ كاملَ الحيّزِ الخلويّ للقِطعةِ ما قبلَ عقدةِ رانفييه الأولى. موجةُ ضغطِ العملِ غيرُ المنضبطةِ هذهِ أسميتُها موجةَ ضغطِ العملِ الأوَّليَّةَ الـ Preliminary Action Pressure Wave.

إذاً هيَ فوضى في المناسيبِ والمسار. لكنْ لهذهِ الفوضى مُبرّراتُها. فالموجةُ المَعنيَّةُ هيَ نتاجُ اصطدامٍ انفجاريّ في منطقةِ التَّذخير ما بينَ الموجةِ الارتداديَّةِ وكتلةِ الأنابيبِ المجهريَّةِ. وكأنَّ بالقطعةِ ما قبلَ عقدةِ رانفييه الأولى، بهذا المجازِ التِّقنيّ، تستحيلُ حجرةَ احتراقٍ لإطلاقِ موجةِ الضَّغطِ العاملةِ. لذلك، تعمُّ الفوضى في البدايةِ حيثُ يُستباحُ كلُّ شيءٍ.

هيَ عقدةُ رانفييه الأولى الـ 1st Node of Ranvier، مَنْ يتكفَّلُ بتصحيحِ المسارِ وإعادةِ الأمورِ إلى نصابِها الصَّحيح. تعملُ عقدةُ رانفييه الأولى على ضبطِ مناسيبِ الموجةِ الأوَّليَّةِ ومسارِها أيضاً. هيَ المَرشَحةُ والمِصفاةُ لكلِّ شاذٍّ نافرٍ فيها. بعدَها، تصبحُ مناسيبُ الموجةِ العاملةِ أصغرَ وأكثرَ مُلاءمةً لحاجاتِ النَّقلِ العصبيّ ولشروطِ السَّلامةِ العضويَّةِ. كما ويصبحُ مسارُها مُنتظماً شاغلاً لقطاعٍ أنبوبيّ مركزيّ مِنَ البلاسما العصبيَّةِ يمتدُّ بينَ عقدتَينِ مُتتاليتَينِ مِنْ عقدِ رانفييه. عندَها، يصحُّ لنا أنْ نتكلَّمَ عنْ موجةِ ضغطِ العملِ القياسيَّةِ الـ Standard Action Pressure Wave.

حفظُ المسارِ الجديدِ لموجةِ ضغطِ العملِ، كما وحفظُ مناسيبِ الموجةِ القياسيَّةِ، سيكونانِ الشُّغلَ الشَّاغلَ لعُقدِ رانفييه التَّاليات. فالرّحلةُ طويلةٌ بينَ المَنبتِ والمُنتهى، قدْ تبلغُ المترَ أو أكثرَ مِنْ ذلكَ في بعضِ الأحيانِ. واحتمالاتُ الجُنوحِ وانحرافِ المناسيبِ تبقى قائمةً ما لمْ تصلِ الموجةُ إلى غايتِها في المشبكِ العصبيّ الانتهائيّ.. لكنْ لا خوفَ. فالعضويَّةُ الحيَّةُ تمرَّستِ النَّقلَ، واعتادتْ ترميمَ الضَّياعاتِ وتصحيحَ الاعوجاجاتِ. الأمانةُ مَصونةٌ، والشَّاهدُ بقاءُ النَّوعِ رغمَ الأهوالِ المُحدقةِ أبداً.

أخيراً أقولُ، موجةُ ضغطِ العملِ واحدةٌ خلالَ عمليَّةِ النَّقلِ العصبيَّةِ الواحدةِ، وإنْ بدتْ خلافَ ذلك. هيَ تبدأُ بفوضى في المسارِ وغلوٍّ في المناسيبِ مَحكومةً بنشأتِها الصَّاخبةِ والعنيفةِ. لكنَّها سريعاً ما تنسخُ عنها طابعَها الخشنَ، وتلبسُ لبوساً قياسيّاً مناسباً لعمليَّةِ النَّقلِ ولسلامةِ البنيةِ التَّشريحيَّةِ العصبيَّةِ كذلك. هوَ المرورُ الأوَّلُ لها عبرَ عقدِ رانفييه مَنْ يعيدُ لها التَّوازنَ مساراً ومناسيبَ.

مُلاحظةٌ:

لمشاهدةِ فيديو قصير يشرحُ تفصيلاً موجاتِ الضَّغطِ العاملةَ حينَ النَّقلِ العصبيّ، انقرْ على هذا الرَّابط

مُلاحظةٌ:

الدِّراسةُ التَّفصيليَّةُ لآليَّةِ عملِ عقدِ رانفييه الـ Nodes of Ranvier هيَ موضوعُ مقالٍ منفصلٍ عنوانُه:
عقدةُ رانفييه، ضابطةُ الإيقاعِ

٤ـ١ خصائصُ موجةِ ضغطِ العملِ ومناسيبُها
The Parameters of The Action Pressure Wave

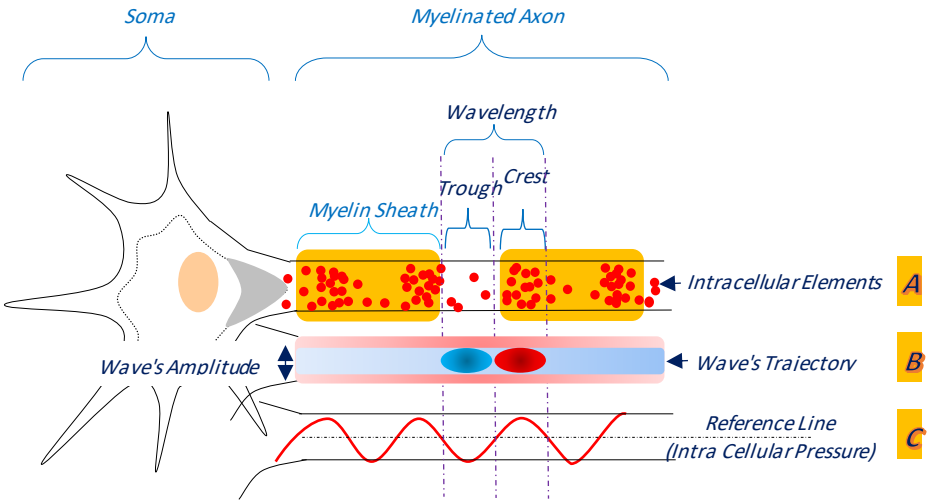
موجةُ ضغطِ العملِ هيَ موجةٌ طولانيَّةٌ الـ Longitudinal Wave، يتطابقُ فيها محورُ حركةِ عناصرِ المادةِ مع محور انتشار الموجةِ. نميِّزُ في الموجةِ منطقتينِ متباينتينِ في الوصفِ كما في الوظيفةِ. فأمَّا الأولى فهضبةُ الـ Compression (Crest) تتصدَّرُ الموجةَ وتكونُ قيمُ الضَّغطِ فيها موجبةً على الدَّوامِ. وأمَّا الثَّانيةُ فوادِ الـ Rarefaction (Trough) يتذيَّلُ الأولى ويلتزمُ قيمَ الضَّغطِ السَّالبةَ دوماً. كما نميِّزُ في الأولى قيمةً مِنَ الضَّغطِ الموجبِ أعظميَّةً، وفي الثَّانيةِ قيمةً مِنَ الضَّغطِ السَّالبِ أعظميَّةً هيَ الأخرى. تتطابقُ القيمتانِ عدديَّاً، وتتعاكسانِ إشارةً فقط؛ ***انظرِ الشَّكلَ (٤-C).***

الطَّاقةُ الحركيَّةُ لموجةِ ضغطِ العملِ تُختزنُ في جبهةِ الموجة الـ Wave's Front، أيْ في الهضبةِ الـ Crest. بينما يلعبُ الضَّغطُ السَّالبُ لذيلِ موجةِ الضَّغطِ الـ Trough دوراً أساسيَّاً في خلقِ كمونِ العملِ ومِنْ ثمَّ تيَّاراتِ النَّقلِ الكهربائيَّةِ على أنواعِها، كما سنرى لاحقاً.

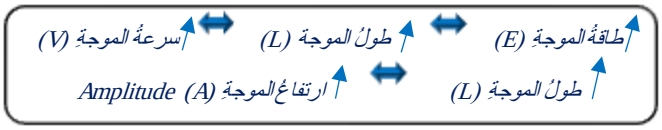
وفي المناسيبِ الـ Wave's Parameters، أبدأُ بطولِ الموجةِ لأنَّهُ الأسهلُ تحديداً وفهماً مِنْ جهةٍ، وهوَ الأساسُ لتحديدِ بقيَّةِ المناسيبِ مِنْ جهةٍ أخرى. فطولُ الموجةِ الـ Wavelength (L) هوَ المسافةُ ما بينَ قمَّتينِ موجبتَّينِ متتاليتَّينِ، أو ما بينَ قمَّتينِ سالبتَّينِ متتاليتَّينِ أيضاً.. لا فرقَ. هوَ بكلماتٍ أخرى مجموعُ طولي الهضبةِ الـ Crest والوادي الـ Trough معاً. بناءً على طولِ الموجةِ، يتحدَّدُ ارتفاعُها الـ Amplitude (A)، وطاقتُها الحركيَّةُ والكامنةُ، كما وسرعتُها أيضاً. فجميعُها ينتظمُ بعلاقةٍ خطَّيةٍ مع طولِ الموجةِ. ارتفعَ هذا الأخيرُ ارتفعتْ معهُ جميعُ المناسيبِ الأخرى.

خلافاً للموجاتِ العرضانيَّةِ الـ Transversal Waves، ارتفاعُ موجةِ الضَّغطِ الطُّولانيَّةِ عسيرٌ على القياس كما الفهمِ. لكنْ للتَّبسيطِ، تخيَّلْ معي مسارَ موجةِ الضَّغطِ الـ Wave's Trajectory أنبوباً اسطوانيَّاً ثلاثيَّ الأبعادِ مُعلَّقاً داخلَ وسطِ الانتشار (بلاسما اللِّيفِ العصبيّ هنا). وهوَ تصوُّرٌ يطابقُ الواقعَ تماماً، فذلكَ هوَ شكلُ مساراتِ جميعِ الموجاتِ الطُّولانيَّةِ. خلالَ وحدةِ الزَّمنِ، يصبحُ مسارُ الموجةِ دائرةً؛ قطرُها هوَ ارتفاعُ الموجةِ؛ ***انظرِ الشَّكلَ (٤-B).***

العلاقةُ وثيقةٌ بينَ طولِ الموجةِ وارتفاعِها، ولهذا تبعاتُه الجليلةُ كما سنرى عندَ دراسةِ أثرِ قطرِ اللِّيفِ العصبيّ على سرعةِ النَّقلِ العصبيّ. سرعةُ موجةِ ضغطِ العملِ الـ Wave's Velocity (V) هيَ الأخرى ملتصقةٌ بطولِ موجتِها (L)، وتالياً بارتفاعِ الموجةِ الـ Amplitude (A). لعلَّكَ الآنَ استشرفتَ أثرَ قطرِ اللِّيفِ العصبيّ على سرعةِ النَّقلِ العصبيّ. إنْ لمْ تفعلْ فلا تقلقْ فشرحُه باتَ قريباً؛ ***انظرِ الشَّكلَ (٤).***



الشَّكل (٤)
مناسيبُ موجةِ الضَّغطِ العاملةِ
The Parameters of The Action Pressure Wave



كما في جميعِ الموجاتِ الطُّولانيَّةِ،
توجدُ علاقةُ تناسبٍ طرديّ بينَ طولِ الموجةِ الـ Wavelength (L) ومحمولِها مِنَ الطَّاقةِ الـ Energy (E).
كلَّما ارتفعتْ قيمةُ هذهِ الأخيرةِ ازدادتْ معَه طولُ الموجةِ النَّاشئةِ عنها والنَّاقلةِ لها في الوقتِ نفسِه. معلومٌ كذلكَ أنَّ سرعةَ الموجةِ الـ (V) تتناسبُ طرداً مع طولِها؛ حيثُ السُّرعةُ (V=Lf) يرمزُ الحرفُ (f) إلى تواترِ الموجةِ.

بتثبيتِ وسطِ الانتشار (بلاسما اللِّيفِ العصبيّ هنا)، ونوعِ الموجةِ (موجةُ الضَّغطِ ههنا)، يصبحُ طولُ الموجةِ وارتفاعُها الـ Amplitude (A) متلازمَين لا يفترقان.
فلكلّ طولٍ مِنْ أطوالِ الموجاتِ ارتفاعٌ موائمٌ لهُ ومصاحبٌ لهُ على الدَّوام.

خلافاً لواقعِ حالِ الموجاتِ العرضانيَّةِ الـ Transversal Waves، لا يمكننا في الموجاتِ الطُّولانيَّةِ الـ Longitudinal Waves، كموجةِ الضَّغطِ الـ Pressure Wave في مثالِنا هنا، حسابُ ارتفاعِ الموجةِ بتلكِ السُّهولةِ. مع ذلكَ وتبسيطاً للعرضِ، يتمُّ غالباً تمثيلُ الموجةِ الطُّولانيَّةِ بمخطَّطِ الموجاتِ العرضانيَّةِ جيبيّ الشَّكل.
القواسمُ المشتركةُ بينهما كثيرةٌ وتختلفان بطريقةِ تحديدِ ارتفاعِ الموجةِ.

تنتشرُ الموجاتُ الطُّولانيَّةُ على شكلِ أنبوبٍ في فضاءٍ ثلاثيّ الأبعاد. يمكنُ لنا إذاً أنْ نحدِّدَ لهذا المسارِ طولاً وارتفاعاً.
هذا الأخيرُ ما هوَ إلا ارتفاعُ الموجةِ الطُّولانيَّةِ؛ **انظرِ الشَّكل (B).**

تنتشرُ موجةُ الضَّغطِ داخلَ اللِّيفِ العصبيّ، لذلكَ كانَ مِنَ المُحتَّمِ تأثُّرُها بقطرِ هذا الأخير.

فمتى اختلفَ قطرُ اللِّيفِ العصبيّ،
اختلفَ معهُ نتيجةً ارتفاعُ وطولُ وتالياً سرعةُ موجةِ الضَّغطِ العاملةِ داخلَه بذاتِ الاتِّجاه صعوداً أمْ هبوطاً.

الشَّكلُ (A) التَّمثيلُ الحقيقيُّ لموجةِ ضغطِ العمل: تسري موجةُ ضغطِ العملِ في اللِّيف العصبيّ باتِّجاهِ المشبكِ العصبيّ الانتهائيّ. أثناءَ مرورِها، تتحرَّكُ عناصرُ البلاسما الـ Intracellular Elements بجهةِ انتشارِ الموجة.
تتراصُّ العناصرُ في جبهةِ الموجةِ الـ Crest، وتتباعدُ في ذيلِها الـ Trough. تختزنُ جبهةُ الموجةِ طاقتَها الحركيَّةَ والكامنةَ، بينما يعملُ ذيلُ الموجةِ سالبُ قيمةِ الضَّغطِ على بناءِ كمونات العمل.

الشَّكلُ (B) تمثيلٌ مجازيٌّ لموجةِ ضغطِ العملِ: غالباً ما أُشيرُ إلى القسمِ موجبِ القيمةِ مِنْ موجةِ الضَّغطِ الـ Crest باستعمالِ مصطلحِ جبهةِ الموجةِ الـ Wave's Front (الجسمُ البيضويُّ أحمرُ اللَّونِ).
جبهةُ الموجةِ تعبيرٌ دقيقٌ عنْ واقعِ الحالِ، فهوَ يتقدَّمُ ويختزنُ طاقةَ الموجةِ العاملةِ. بالمقابلِ، لا أدقَّ مِنْ ذيلِ الموجةِ (الجسمُ البيضويُّ أزرقُ اللَّونِ) دلالةً على القسمِ الثَّاني سالبِ القيمةِ مِنْ موجةِ الضَّغطِ الـ Trough.
جمعُ طولِ الجبهةِ إلى طولِ الذَّيلِ يعطينا طولَ الموجةِ الحقيقيَّ.

الشَّكلُ (C) تغيُّراتُ قيمةِ الضَّغطِ داخلَ اللِّيفِ العصبيِّ عندَ مرورِ موجةِ ضغطِ العملِ: بدهيٌّ القولُ بارتفاعِ قيمةِ الضَّغطِ داخلَ اللِّيفِ العصبيِّ عندَ جبهةِ الموجةِ، وتراجعِه إلى قيمٍ سالبةٍ عندَ ذيلِها. عندَ مطابقةِ ذلكَ مع واقعِ الحالِ، نجدُ كثافةَ المادَّةِ في وحدةِ الحجمِ عندَ الجبهةِ، وتخلخلَها وندرتَها عندَ الذَّيلِ.

٢ ـ كمونَاتُ العملِ The Action Potentials

٢ـ١ كمونُ الرَّاحةِ The Resting Potential

كمونُ الرَّاحةِ هوَ التَّعبيرُ اللُّغويُّ عنِ الحالةِ الكهربائيَّةِ لحيِّزٍ تشريحيٍّ معلومِ الحدودِ، بَيِّنِ المواصفاتِ، عندَما يكونُ في حالةِ الرَّاحةِ. وحينَ تتعطَّلُ كاملُ الوظيفةِ المنوطةِ بهذا المكانِ، ويكونُ على حالتِه الأساسِ التي فُطرَ عليها.

ففي حالةِ الرَّاحةِ، تسيطرُ على الدَّاخلِ الخلويِّ الـ Intracellular Space قطبيَّةٌ كهربائيَّةٌ سالبةٌ الـ Negative Polarity، بينما تهيمنُ القطبيَّةُ الموجبةُ الـ Positive Polarity على الخارجِ الخلويِّ الـ Extracellular Space.

تراكمُ الشَّواردِ الموجبةِ الـ Positive Ions، لا سيَّما شاردةِ الصُّوديوم Na^+، في الحيِّزِ خارجِ الخليَّةِ أعطاهُ القطبيَّةَ الموجبةَ. بالمقابلِ، نجدُ في الحيِّزِ داخلِ الخليَّةِ جمعاً كبيراً طاغياً مِنَ العناصرِ سالبةِ القطبيَّةِ، كالبروتيناتِ مثلاً، فكانتْ لها القطبيَّةُ السَّالبةُ نتيجةً.

لمشاهدةِ فيديو قصير يشرحُ تفصيلاً تشريحَ اللِّيفِ العصبيِّ، انقرْ على هذا الرَّابط:

٢ـ٢ كمونُ العملِ الأوَّليُّ Preliminary Action Potential

حينَ يبلغُ التَّنبيهُ عتبةَ الأمرِ، ويصلُ إلى منطقةِ التَّذخيرِ، يحدُثُ انفراغٌ مفاجئٌ داخلَ هذهِ المنطقةِ. تقلُّصُ كتلةِ الأنابيبِ المجهريَّةِ وانسحابُها السَّريعُ داخلَ جسمِ الخليَّةِ العصبيَّةِ، يُحدِثُ خلاءً فانقلاباً في قيمةِ الضَّغطِ فيها. فبعدَ ضغطِ الرَّاحةِ الموجبِ، تحُلُّ سلبيَّةٌ في الضَّغطِ تقلبُ الأوضاعَ وتحرّكُ السَّواكنَ؛ **انظرِ الشَّكلين (٥-A) & (٥-B).**

الضَّغطُ السَّالبُ الوليدُ في منطقةِ التَّذخيرِ سيفتحُ بوَّاباتِ أقنيةِ شاردةِ الصُّوديوم كثيفةِ التَّواجدِ فيها، هذا مِنْ جهةٍ. وسيسحبُ شوارِدَ الصُّوديوم إلى الدَّاخلِ الخلويِّ إعلاناً بقطبيَّةٍ جديدةٍ لهذا الدَّاخلِ، مِنْ جهةٍ أخرى. هيَ قطبيَّةٌ موجبةٌ على ما يظهرُ جليّاً. قطبيَّةٌ موجبةٌ تعاكسُ قطبيَّةَ باقي الدَّاخلِ الخلويِّ السَّالبةَ أساساً. ما بينَ قطبيَّةٍ موجبةٍ ناشئةٍ في منطقةِ التَّذخيرِ، وقطبيَّةٍ سالبةٍ مسيطرةٍ أساساً داخلَ اللِّيفِ العصبيِّ، يُخلقُ كمونُ عملٍ أسميتُه كمونَ العملِ الأوليَّ الـ Preliminary Action Potential؛ **انظرِ الشَّكلَ (٥-C).**

هوَ أوَّليٌّ لأنَّهُ الأصلُ والأساسُ لأوَّلِ شرارةٍ كهربائيَّةٍ في عمليَّةِ النَّقلِ العصبيّ، هذا أوَّلاً. ولأنَّ فعلَهُ ينتهي عندَ أعتابِ أوَّلِ عقدةٍ رانفييه، هذا ثانياً. ولأنَّهُ يختلفُ بالقيمةِ عمَّا سيأتي بعدَه مِنْ كمونات عملٍ قياسيَّةٍ ستكونُ متطابقةً فيما بينها، ثالثاً.

مباشرةً بعدَ تخلُّقِهِ، يَحدثُ انفراغٌ كهربائيٌّ ما بينَ قطبيَّةٍ موجبةٍ طارئةٍ في منطقةِ التَّذخير وقطبيَّةٍ سالبةٍ مقيمةٍ أبداً داخلَ اللِّيفِ العصبيّ. في الوقتِ ذاتِه، تكونُ موجةُ الضَّغطِ الارتداديَّةُ قدْ صدمتْ عنيفاً كتلةَ الأنابيبِ المجهريَّةِ معلنةً ولادةَ موجةِ ضغطِ العمل.

أخيراً، صحيحٌ القولُ أنَّ كمونَ العملِ الأوليَّ هوَ السَّابقُ لجميعِ كمونات العملِ العاملةِ في عمليَّةِ النَّقلِ العصبيّ الواحدةِ، لكنَّ تأثيرَه ينتهي تماماً عندَ حدودِ عقدةِ رانفييه الأولى، دونَ أنْ يكونَ هوَ سبباً في ولادةِ كمونِ العملِ القادم. وبذلكَ هوَ يختلفُ بالجوهر عنْ موجةِ ضغطِ العملِ الأوَّليَّةِ وإنْ هوَ شاركَها التَّسميةَ، فاقتضى التَّوضيح.

لمشاهدةِ فيديو قصير يشرحُ تفصيلاً ولادةَ كمونِ العملِ الأوَّليّ، انقرْ على هذا الرَّابط:

٢-٣ كمونَاتُ العملِ القياسيَّةُ The Standard Action Potentials

هنَّ مجموعةٌ متماثلةٌ مِنْ كمونات العمل، يختلفُ عددُها باختلافِ عددِ عُقدِ رانفييه في اللِّيفِ العصبيّ. يبدأُ أوَّلُها في عقدةِ رانفييه الأولى، ويختارُ آخرُها آخرَ عقدةٍ مُنطلقاً لهُ. يتلو بعضُها بعضاً في متواليةٍ حركيَّةٍ منتظمةٍ. كلُّ مفردةٍ منها تهتمُّ بشؤونِ القطعةِ بينَ عقدتَينِ موافقة.

في عقدةِ رانفييه، وحينَ وصولِ موجةِ ضغطِ العمل، يعملُ الضَّغطُ السَّالبُ لذيلِ الموجةِ على فتحِ بوَّاباتِ أقنيةِ شاردةِ الصُّوديوم Na^+، واستدعاءِ هذه الأخيرةِ إلى الدَّاخلِ الخلويّ. تراكمُ شواردِ الصُّوديوم في بلاسما العقدةِ هوَ الإعلانُ الرَّسميُّ عنْ ولادةِ القطبيَّةِ الموجبةِ لكمونِ العملِ القياسيّ. تعملُ القطبيَّةُ الموجبةُ الوليدةُ هذهِ معَ القطبيَّةِ السَّالبةِ المُسيطرةِ أساساً في الدَّاخلِ الخلويّ للقطعةِ بينَ عقدتَينِ الموافقةِ على بناءِ كمونِ العملِ القياسيّ.

تتكرَّرُ هذهِ المشهديَّةُ بتفاصيلِها الدَّقيقةِ عندَ كلِّ عقدةٍ مِنْ عقدِ رانفييه وصولاً إلى الانتفاخِ ما قبلَ المشبكِ العصبيّ، حيثُ نشهدُ هناكَ ولادةَ كمونِ العملِ الانتهائيّ؛ **انظرِ الشَّكلَ (٥-D).**

لمشاهدةِ فيديو قصير يشرحُ تفصيلاً ولادةَ كمونات العملِ القياسيَّةِ، انقرْ على هذا الرَّابط:

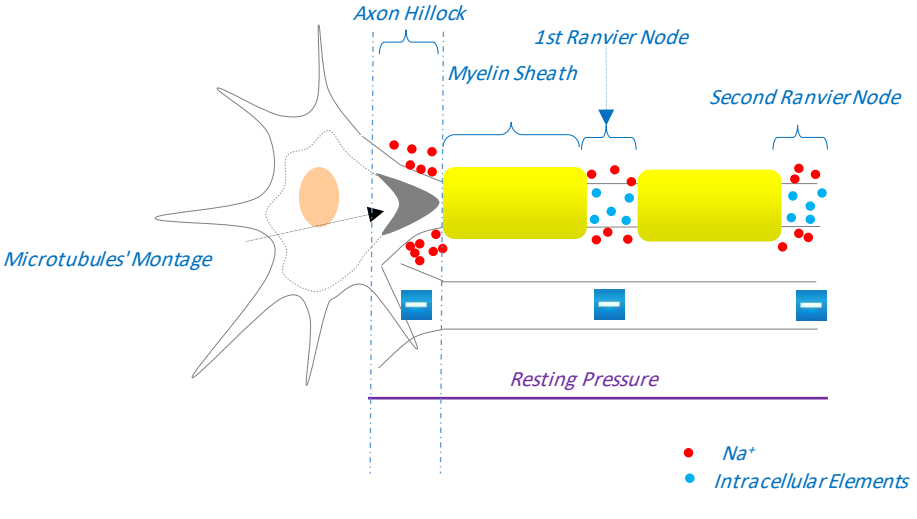
٢-٤ كمونُ العملِ الانتهائيُّ The Terminal Action Potential

هوَ كمونُ عملٍ أيضاً، لكنَّهُ بمواصفاتٍ خاصَّةٍ. فهوَ آخرُ كمونِ عملٍ خلالَ عمليَّةِ النَّقلِ العصبيّ. وهوَ الأساسُ لتيَّارِ النَّقلِ الكهربائيّ الانتهائيّ الـ Terminal Current.

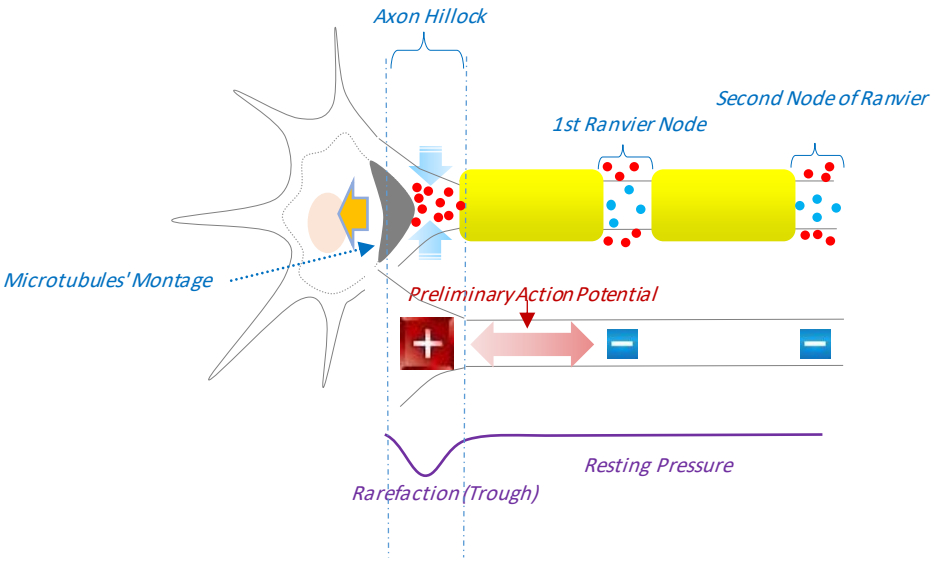
هوَ كمونُ عملٍ عابرٌ للمشبكِ العصبيّ؛ قطبيَّتُهُ الموجبةُ تُبنَى في الانتفاخِ ما قبلَ المشبكِ العصبيّ، وقطبيَّتُهُ السَّالبةُ تستوطنُ الدَّاخلَ الخلويَّ للعضوِ الهدفِ ما بعدَ المشبكِ العصبيّ الـ Postsynaptic Effector Organ. هوَ يعتمدُ شاردةَ الكالسيومِ Ca^{++} لبناءِ القطبيَّةِ الموجبة.

وأخيراً، هوَ أعلى قطبيَّةً مِنْ باقي كمونات العملِ القياسيَّةِ لسبَبين؛ قطبيَّةُ شاردةِ الكالسيوم Ca^{++} أعلى قيمةً مِنْ قطبيَّةِ شاردةِ الصُّوديومِ Na^{+}، هذا **أوَّلاً**. **وثانياً**، هوَ يستدعي كمَّاً أكبرَ مِنْ شاردةِ الكالسيوم إلى داخلِ الانتفاخِ ما قبلَ المشبكِ كبير القطر نسبيَّاً؛ **انظرِ الشَّكلَ (٦)**.

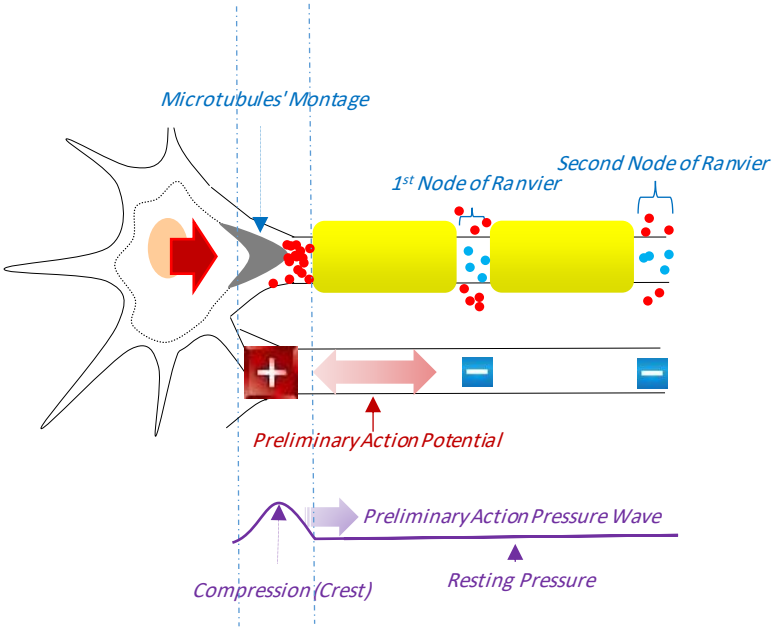
لمشاهدةِ فيديو قصير يشرحُ تفصيلاً ولادةَ كمون العمل الانتهائيّ، انقرْ على هذا الرَّابط:



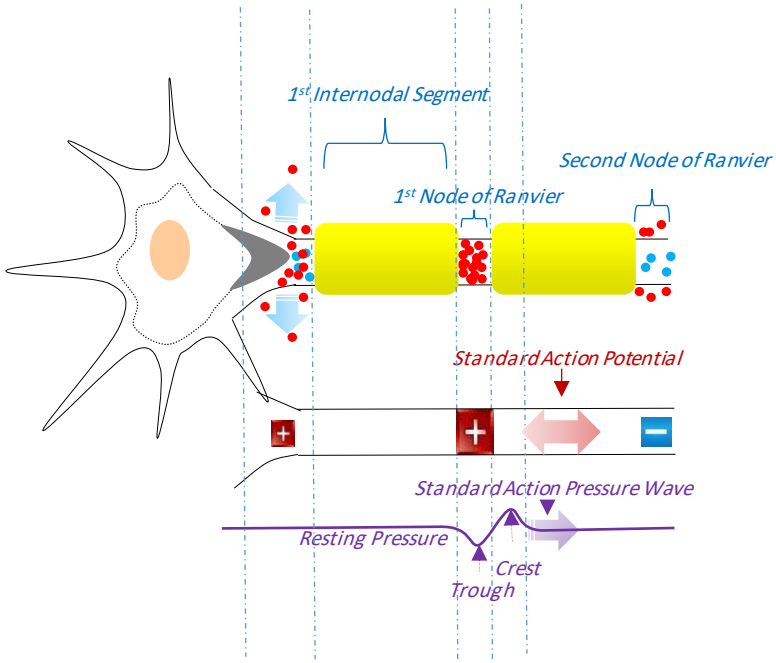
A



B



C



D

الشَّكلُ (٥)

كمونُ العملِ الأوَّليُّ & وكمونـاتُ العملِ القياسيَّةُ

The Preliminary & The Standard Action Potentials

حجرةُ التَّذخيرِ الـ Axon Hillock هيَ المنطقةُ الفاصلةُ بينَ جسمِ العصبون الـ Soma ومحورِها العصبيّ الـ Axon.
يُعتقدُ أنَّ عمليَّةَ النَّقلِ العصبيّ تبدأ منها، أو أبعدَ مِنْ ذلكَ بقليلٍ على ما انتهتْ إليهِ أحدثُ الدِّراسات.

لهذهِ المنطقةِ خاصَّتان:
أوَّلُهما، تجتمعُ فيها الأنابيبُ المجهريَّةُ الـ Microtubules بكثافةٍ مشكِّلةً ما يشبهُ المخروطَ بقاعدةٍ مركزيَّةٍ وقمَّةٍ محيطيَّةٍ تناظرُ المحورَ العصبيَّ. هذا التَّشكيلُ مِنَ الأنابيبِ المجهريَّةِ أسميتُهُ الـ Microtubules' Montage.
وثانيهُما، تكثُرُ فيها أقنيةُ شاردةِ الصُّوديوم ذاتُ الأبوابِ العاملةِ بالضَّغطِ الـ Pressure Gated Na^+ Channels (١٠٠-٢٠٠ قناة).

A) في حالةِ الرَّاحةِ الوظيفيَّة: تندخلُ كتلةُ الأنابيبِ المجهريَّةِ برأسِها في بدايةِ المحورِ العصبيّ. ويكونُ الوسطُ داخلَ المحورِ العصبيّ سالبَ القطبيَّةِ بسببِ كتلةِ البروتيناتِ الدَّاخليَّةِ سالبةِ القطبيَّةِ أساساً. في الحقيقةِ، معظمُ عناصرِ الدَّاخلِ الـ Intracellular Elements هيَ سالبةُ القطبيَّةِ كذلك.
بالمقابلِ، يُشحنُ الوسطُ خارجَ الخلايا الـ Extracellular Space إيجاباً بفعلِ تراكمِ الشَّواردِ موجبةِ القطبيَّةِ، كشاردةِ الصُّوديوم Na^+ خصوصاً.

B) في مرحلةِ التَّنخير: عندَما يصلُ التَّنبيهُ إلى منطقةِ التَّذخيرِ الـ Axon Hillock، تتقلَّصُ كتلةُ الأنابيبِ المجهريَّةِ وتتراجعُ للخلفِ (السَّهمُ الأصفرُ). تراجعُها الخاطفُ يخلقُ فراغاً الـ Rarefaction في المنطقةِ.
يعملُ الفراغُ الوليدُ على شفطِ شواردِ الصُّوديومِ Na^+ إلى الدَّاخلِ الخلويّ (السَّهمُ الأزرقُ).
الدُّخولُ الكثيفُ لشواردِ الصُّوديوم يقلبُ قطبيَّةَ المنطقةِ نحوَ الإيجاب. فنقولُ، بولادةِ قطبيَّةٍ موجبةٍ في منطقةِ التَّذخيرِ تُقابلُ القطبيَّةَ السَّالبةَ لباقي المحورِ العصبيّ. وكما **نعلمُ،**
قطبيَّةٌ موجبةٌ مقابلُ قطبيَّةٍ سالبةٍ هيَ التَّجسيدُ العمليَّاتيُّ لمفهومِ كمونِ العملِ الـ Action Potential.

C) في مرحلةِ الإطلاق الـ Firing: ترتدُّ موجةُ الضَّغطِ المركزيَّةُ صادمةً كتلةَ الأنابيبِ المجهريَّةِ في منطقةِ التَّذخير. فتتمدَّدَ هذهِ الأخيرةُ وتندفعَ بعيداً حتَّى حدودِ المحورِ العصبيّ مُعلنةً ولادةَ موجةِ ضغطِ العملِ الـ Action Pressure Wave.
ما بينَ تراجعٍ واندفاعٍ خاطفَين، تعملُ كتلةُ الأنابيبِ المجهريَّةِ كذراعِ ضاغطٍ الـ Piston لخلقِ موجةِ ضغطِ العملِ هذه.

مُلاحظةٌ (١):

يسبقُ كمونُ العملِ الأوَّليُّ موجةَ ضغطِ العملِ الأوَّليَّةَ في النَّشأة.
وهيَ تراتبيَّةٌ هامَّةٌ يفرضُها الاختصاصُ الوظيفيُّ لكلٍّ منهما. فَالأوَّلُ، يهتمُّ بتنظيمِ عناصرِ البلاسما داخلَ المسارِ المُستقبليّ الـ Future Trajectory للثَّانية.
وسنرى قريباً أهميَّةَ ذلكَ في زيادةِ سرعةِ موجةِ ضغطِ العملِ، وفي تقليلِ الضَّياعاتِ الطَّاقيَّة، على حدٍّ سواء.

D) كمونات العملِ القياسيَّةُ Standard Action Potentials: عندَ وصولِها إلى أوَّلِ عقدةٍ رانفييه، وبمشهديَّةٍ مطابقةٍ لما حدثَ في منطقةِ التَّذخير، يعملُ الضَّغطُ السَّلبيُّ لذيلِ موجةِ ضغطِ العملِ على فتحِ مغاليقِ أقنيةِ شاردةِ الصُّوديوم، وعلى سحبِ هذهِ الأخيرةِ إلى الدَّاخلِ الخلويّ.
فنقولُ بولادةِ قطبيَّةٍ موجبةٍ جديدةٍ داخلَ عقدةٍ رانفييه الأولى.
القطبيَّةُ الموجبةُ الجديدةُ أقلُّ قيمةً مِنْ سابقتِها الأوَّليَّة. القطبيَّةُ الموجبةُ الجديدةُ ستكونُ المنطلقَ لكمونِ عملٍ قياسيٍّ يتجدَّدُ عندَ كلِّ عقدةٍ مِنْ عُقدِ رانفييه وصولاً إلى المشبكِ الانتهائيّ، حيثُ تكونُ هناكَ ولادةُ القطبيَّةِ الموجبةِ الأخيرةِ في عمليَّةِ النَّقلِ العصبيّ.

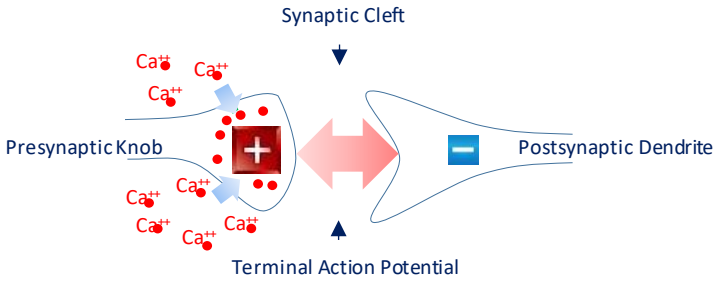
ملاحظة(٢):

القطبيَّةُ الموجبةُ الأخيرةُ في عمليَّةِ النَّقلِ العصبيّ ستكونُ الأساسَ لكمونِ العملِ الانتهائيّ العابرِ للشَّقِّ المشبكيّ الـ Synaptic Cleft.

.

ملاحظة (٣)

بسببِ عدمِ اكتمالِ نزوحِ شواردِ الصُّوديومِ إلى الحيّزِ خارجَ الخلايا،
تستمرُّ درجةٌ خفيفةٌ مِنَ القطبيَّةِ الموجبةِ في منطقةِ التَّذخير. فنقولُ أنَّ الأخيرةَ في حالةِ عصيان.
وبذلكَ ندركُ سببَ الوجهةِ الثَّابتةِ لعمليَّةِ النَّقلِ العصبيّ،
وباتِّجاهِ المشابكِ العصبيَّةِ على الدَّوام.



الشَّكل (٦)
كمونُ العملِ الانتهائيُّ
The Terminal Action Potential

هوَ آخرُ الكموناتِ العاملةِ.
تُبتَنى القطبيَّةُ الموجبةُ في الانتفاخ ما قبلَ المشبكِ العصبيّ الـ Presynaptic Knob.
وتكونُ القطبيَّةُ السَّالبةُ في الدَّاخلِ الخلويّ للعضوِ الهدفِ ما بعدَ المشبكِ الـ Postsynaptic Effector Organ
(اخترتُ في الرَّسمِ عصبوناً ثانٍ كعضوِ هدفٍ الـ Postsynaptic Dendrite).

يتمايزُ عنْ كلّ ما سبقَه بالتَّالي:
١ - *هوَ كمونٌ بَينيٌّ، الوحيدُ العابرُ للشَّقّ المشبكيّ الـ Synaptic Cleft.*
٢ - *هوَ الأساسُ لتيَّار النَّقلِ الكهربائيّ الانتهائيّ النَّاقلِ الأوحدِ للإشارةِ العصبيَّةِ الـ Neural Signal.*
٣ - *هوَ أكبرُ شدَّةً مِنَ الكموناتِ القياسيَّةِ.*
٤ - *يتمايزُ بالدَّور الأساسِ لشاردةِ الكالسيوم Ca^{++} في بناءِ قطبيَّتِه الموجبةِ الـ Positive Polarity.*

لمشاهدةِ فيديو قصير يشرحُ تفصيلاً كمونات العملِ حينَ النَّقلِ العصبيّ، انقرْ على هذا الرَّابط

٣ - تيَّاراتُ النَّقلِ الكهربائيَّةُ *The Electrical Currents*

٣-١ تيَّارُ النَّقلِ الكهربائيُّ الأوَّليُّ *The Preliminary Electrical Current*

هوَ الانفراغُ الكهربائيُّ الـ Electrical Discharge الخاطفُ بينَ قطبيَّةٍ موجبةٍ طارئةٍ في منطقةِ التَّذخير، وقطبيَّةٍ سالبةٍ مُقيمةٍ فِطريَّاً داخلَ المحور العصبيّ. أثناءَ عمليَّةِ النَّقلِ العصبيّ، وفي مرحلةِ التَّذخير تحديداً، يتخلَّقُ خلاءٌ فسلبيَّةٌ في قيمةِ الضَّغطِ داخلَ منطقةِ التَّذخير. وقدْ علمنا ما لذلكَ مِنْ عظيمِ فعلٍ في بناءِ قطبيَّةٍ موجبةٍ، وتالياً كمونِ عملٍ، ممَّا يغني عنْ إعادةِ الشَّرحِ هنا.

سريعاً بعدَ نشأةِ كمونِ العملِ الأوليّ، ينفرغُ تيَّارٌ كهربائيٌّ يجتاحُ بلاسما المحور العصبيّ حتَّى أعتابِ عقدةِ رانفييه الأولى الـ 1st Node of Ranvier. يعملُ كمونُ العملِ وتيَّارُهُ على رصّ جزيئاتِ المادَّةِ في الحيّزِ داخلِ الخليَّةِ الـ Intracellular Space، رفعاً لكثافتِهِ، وتمهيداً لقدومِ موجةِ ضغطِ العملِ الـ Action Pressure Wave وشيكةِ الولادةِ؛ ***انظرِ الشَّكلَ (٧-A).***

لمشاهدةِ فيديو قصير يشرحُ تفصيلاً ولادةَ تيَّارِ النَّقلِ الكهربائيّ الأوَّليّ، انقرْ على هذا الرَّابط:

٣-٢ تيَّاراتُ النَّقلِ الكهربائيَّةُ القياسيَّةُ The Standard Electrical Currents

في النَّشأةِ، هيَ المَشهديَّةُ ذاتُها تتكرَّرُ على الدَّوام. موجةُ ضغطٍ تسري ضمنَ لمعةِ اللِّيفِ العصبيّ. وضغطٌ سلبيٌّ يتذيَّلُ موجةَ ضغطِ العملِ، يفتحُ مغاليقَ أقنيةٍ ويستدعي كمًّا مِنْ شاردةِ الصُّوديوم Na^+ إلى الدَّاخلِ الخلويّ. فقطبيَّةٌ موجبةٌ تنشأ، تقابلُ قطبيَّةً سالبةً مقيمةً أساساً. ثمَّ يكونُ الانفراغُ الكهربائيُّ حتميَّةً، ويكونُ تيَّارُ النَّقلِ الكهربائيُّ النَّتيجةَ.

ووظيفيّاً، هيَ لا تختلفُ في شيءٍ عنِ التَّيَّارِ الأوَّليّ. فهي تيَّاراتٌ وظيفيَّةٌ تساعدُ على انتشارِ موجةِ ضغطِ العملِ، وتقليلِ ضياعاتِ الطَّاقةِ فيها، بخلقِ مساراتِ انتشارٍ ذاتِ مواصفاتٍ قياسيَّةٍ. كلُّ تيَّارٍ قياسيٍّ يهتمُّ بشؤونِ المسارِ في قطعتهِ الخاصَّةِ. وكأنَّ الواحدَ منها ينظِّمُ مسارَ موجةِ الضَّغطِ العاملةِ في قطعةٍ منه. تكاملُ القطعِ الجزئيَّةِ هذهِ يصنعُ مسارَ الموجةِ الكلِّيَّ الـ Wave's Trajectory.

أمَّا فيما خصَّ الشَّكلَ، فيمكنُنا تمييزُ بعضِ الفروقِ البسيطةِ. فهيَ مجموعةُ تيَّاراتٍ كهربائيَّةٍ مُتماثلةٍ في الشِّدَّةِ وجهةِ شعاعِ قوَّتِها. يُطابقُ عديدُها عديدَ عُقدِ رانفييه في اللِّيفِ العصبيّ. فكلُّ عقدةٍ منهُ هيَ المُنطلقُ لتيَّارٍ منها. يتبعُ بعضُها بعضاً في مُتواليةٍ حركيَّةٍ مُدهشةٍ. حيثُ يبدأُ اللَّاحقُ منها مِنْ حيثُ انتهى السَّابقُ وصولاً إلى الانتفاخِ ما قبلَ المشبكِ العصبيّ. كما هيَ أقلُّ شدَّةً مِنَ التيَّارِ الأوَّليّ، وبالتَّالي أكثرُ انسجاماً مع معاييرِ السَّلامةِ النَّسيجيَّةِ. هيَ أكثرُ احتراماً لمبدأِ النِّسبةِ والتَّناسبِ بينَ ضروراتِ الوظيفةِ وضروراتِ السَّلامةِ؛ **انظرِ الشَّكلَ (٧-A).**

لمشاهدةِ فيديو قصير يشرحُ تفصيلاً ولادةَ تيَّاراتِ النَّقلِ القياسيَّةِ، انقرْ على هذا الرَّابط:

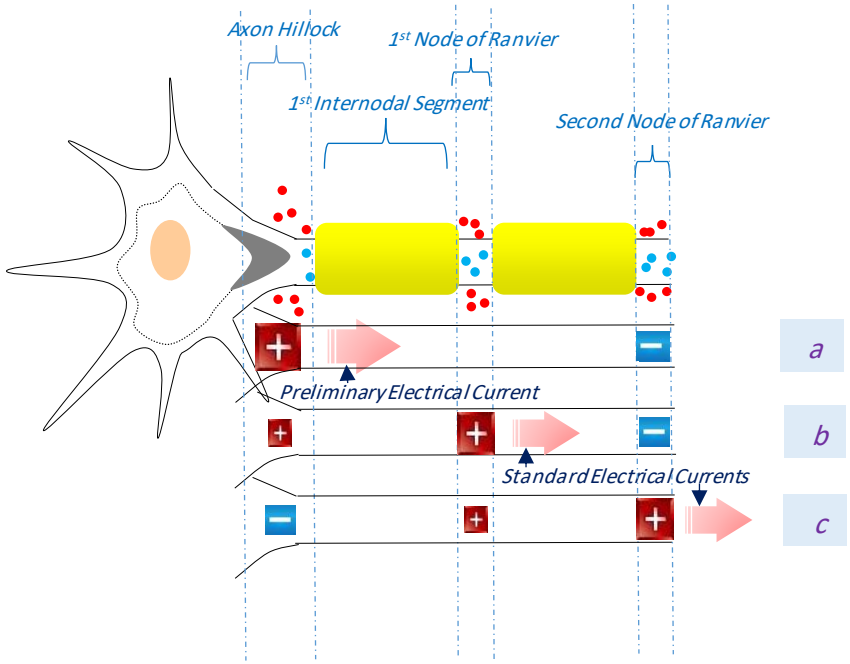
٣-٣ تيَّارُ النَّقلِ الكهربائيُّ الانتهائيُّ Terminal Electrical Current

هوَ التَّيَّارُ الكهربائيُّ الوحيدُ العابرُ للمشبكِ العصبيّ. ينقلُ الإشارةَ العصبيَّةَ مِنَ العصبونِ حيثُ منطلقُه، إلى العضوِ الهدفِ الـ Effector Organ حيثُ مستقرُّه. إذاً، هوَ ناقلٌ للإشارةِ العصبيَّةِ، وليسَ مُسرّعاً لموجةِ ضغطِ العملِ. وبذلكَ، يكونُ تيَّارُ النَّقلِ الكهربائيُّ الانتهائيُّ الوحيدَ الحاملَ لصفةِ ناقلٍ عنِ استحقاقٍ وجدارةٍ.

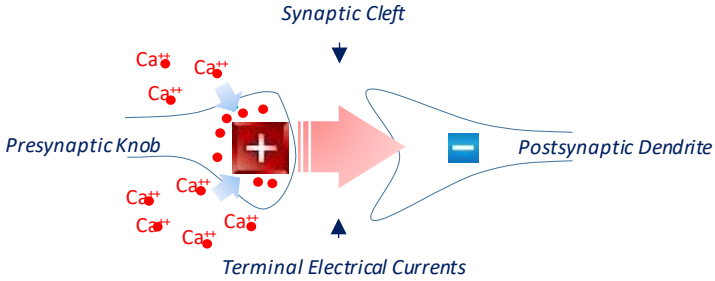
ينطلقُ التَّيَّارُ الانتهائيُّ مِنَ الانتفاخِ ما قبلَ المشبكِ العصبيِّ الـ Knob، وينتهي في العضوِ الهدفِ ما بعدَ المشبك. يُبتَنى قطبُه الموجبُ بدخولٍ سريعٍ وكثيفٍ لشاردةِ الكالسيوم Ca^{++} إلى الدَّاخلِ الخلويّ. وبشاردةِ الكالسيوم Ca^{++} يتمايزُ ثانيةً عمَّا سبقوهُ مِنْ تيَّاراتٍ كهربائيَّةٍ.

مُستفيدةً مِنْ حجمِ مستوعبِها الجديدِ، أيْ الـ Knob، الكبيرِ نسبيّاً ومِنْ قطبيَّتِها الموجبةِ الكبيرةِ أيضاً، تخلقُ شاردةُ الكالسيومِ Ca^{++} كمونَ عملٍ بقيمةٍ كبيرةٍ أكبرَ نسبيّاً مِنْ سابقاتِها مِنْ كموناتِ العملِ. وبشدَّتِه نختمُ ثلاثيَّةَ الفروقِ النَّوعيَّةِ التي تميِّزُ تيَّارَ النَّقلِ الانتهائيَّ عنْ غيرهِ مِنْ تيَّاراتِ النَّقلِ الكهربائيَّةِ؛ **انظرِ الشَّكلَ (٧-B).**

لمشاهدةِ فيديو قصير يشرحُ تفصيلاً ولادةَ تيَّارِ النَّقلِ الانتهائيّ، انقرْ على هذا الرَّابط:



A



B

الشَّكل (٧)

تيَّاراتُ النَّقلِ الكهربائيَّةُ The Electrical Currents

خلالَ عمليَّةِ النَّقلِ العصبيّ، نميّزُ ثلاثةَ تيَّاراتٍ كهربائيَّةٍ وظيفيَّةٍ.

الشَّكل (٧-Aa) تيَّارُ النَّقلِ الكهربائيُّ الأوَّليُّ Preliminary Electrical Current:

هوَ أوَّلُها، ينطلقُ سريعاً بعدَ ابتناءِ كمونِ العملِ الأوَّليّ الـ Preliminary Action Potential في منطقةِ التَّذخير الـ Axon Hillock. وينتهي فعلُه عندَ حدودِ عقدةِ رانفييه الأولى الـ 1st Node of Ranvier.

يتميَّزُ بشدَّتِه قياساً للتيَّاراتِ القياسيَّةِ. لكنَّه يخضعُ لآليَّاتِ النُّشوءِ ذاتِها.

الشَّكل (٧-Ab) & (٧-Ac) تيَّاراتُ النَّقلِ الكهربائيَّةُ القياسيَّةُ Standard Electrical Currents:

هيَ التَّاليةُ، متطابقةٌ، وعديدةٌ بعددِ عقدِ رانفييه في الليفِ العصبيّ الـ Neural Fiber.

يبدأُ باكورتُها في عقدةِ رانفييه الأولى، وينتهي في العقدةِ الثَّانيةِ. كلُّ واحدٍ منها مسؤولٌ عنْ تنظيمِ مسارِ موجةِ ضغطِ العملِ وشيكةِ القدومِ في قطعتِه الخاصَّةِ. لا تتزامنُ أبداً، فاللَّاحقُ منها يبدأُ بعدَ انقضاءِ السَّابقِ له تماماً.

الشَّكل (٧-B) تيَّارُ النَّقلِ الكهربائيُّ الانتهائيُّ Terminal Electrical Current:

هوَ آخرُها بالمُطلق. يبدأُ مِنَ الانتفاخِ ما قبلَ المشبكِ العصبيّ الـ Presynaptic Knob، وينتهي في الدَّاخلِ الخلويّ للعضوِ الهدفِ ما بعدَ المشبكِ العصبيّ الـ Postsynaptic Effector Organ.

(اخترتُ في الرَّسمِ عصبوناً ثانٍ كعضوِ هدفٍ الـ Postsynaptic Dendrite)

يتمايزُ عنْ كلّ ما سبقهُ بالتَّالي:

١. هوَ تيَّارٌ بَينيٌّ، الوحيدُ العابرُ للشَّقّ المشبكيّ الـ Synaptic Cleft.
٢. هوَ الوحيدُ النَّاقلُ للإشارةِ العصبيَّةِ الـ Neural Signal ، بينما التَّيَّاراتُ السَّابقةُ لهُ هيَ مُسرّعاتٌ للنَّقل لا أكثرَ.
٣. هوَ أكبرُ شدَّةً مِنَ التَّيَّاراتِ القياسيَّةِ.
٤. يتمايزُ بدورِ شاردةِ الكالسيوم Ca^{++} الأساس في بناءِ القطبيَّةِ الموجبةِ الـ Positive Polarityلكمونِه العاملِ؛ أيْ لمصعدِ أو مُنطلقِ التَّيَّارِ الـ Cathode.

مُلاحظةٌ:

لمشاهدةِ فيديو قصير يشرحُ تفصيلاً التَّيَّاراتِ الكهربائيَّةَ العاملةَ حينَ النَّقلِ العصبيّ، انقرْ على هذا الرَّابط:

٣-٤ وظيفةُ تيَّاراتِ النَّقلِ الكهربائيَّةِ.. الأوَّليّ والقياسيَّةِ

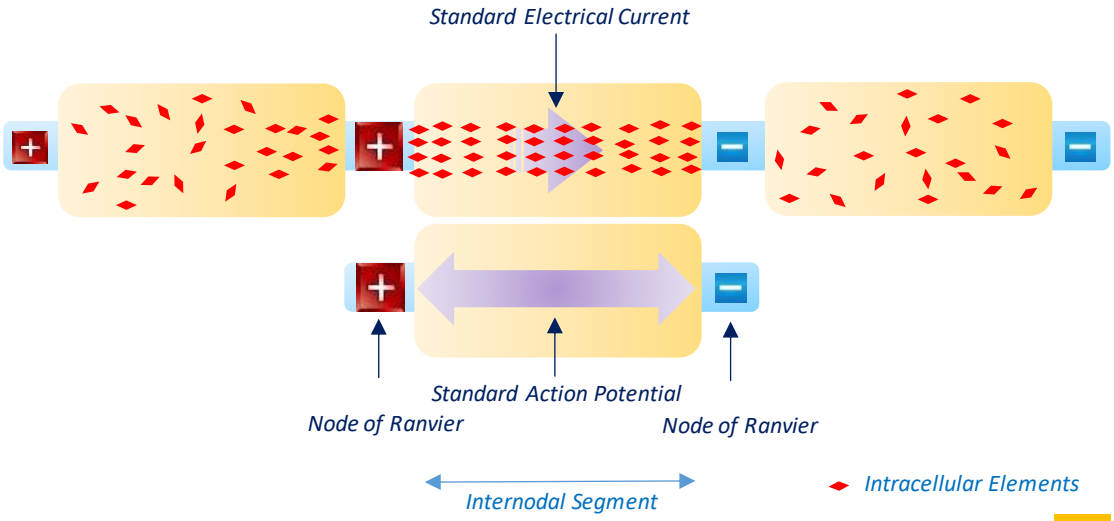
The Function of Preliminary & Standard Electrical Currents

مِنْ أجلِ سرعةٍ كبيرةٍ لموجةِ ضغطِ العملِ الـ Action Pressure Wave، ومِنْ أجلِ تقليلِ ضياعاتِ الطَّاقةِ فيها، كانَ لزاماً رفعُ كفاءةِ وسطِ الانتشار. عمليَّاً، تقومُ تيَّاراتُ العملِ الكهربائيَّةُ بهذا الدَّورِ الجليلِ، ووسائلُها في ذلكَ عبقريَّةٌ وفعَّالةٌ. كلُّ تيَّارٍ يُعنى بقطعةٍ مِنَ المسارِ المُستقبليّ للموجةِ العاملةِ الـ Future Wave's Trajectory. تكاملُ القطعِ الجزئيَّةِ سيصنعُ مسارَ الموجةِ الكليَّ.

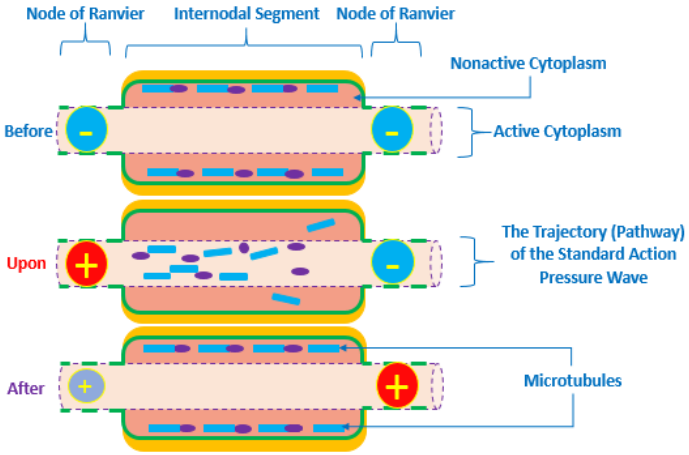
فسريعاً بعدَ تشكُّلِ كمونِ العملِ الخاصّ بقطعةٍ ما بينَ عقدتَينِ الـ Internodal Segment، ينطلقُ التَّيَّارُ الكهربائيُّ مُباشِراً مَهامَّهُ التَّنظيميَّةَ. يُنظِّمُ ما توافرَ مِنْ عناصرِ البلاسما الخلويَّةِ الـ Intracellular Elements مِنْ بروتيناتٍ وشواردَ داخلِ خلويَّةٍ في تنسيقٍ عاليَ الكثافةِ، هذا مِنْ جهةٍ. كما ويستدعي عناصرَ إضافيَّةً لمْ تكُ موجودةً مِنْ قبلُ في حالةِ الرَّاحةِ؛ وأعني هنا مُكوّناتِ الأنابيبِ المجهريَّةِ الـ Microtubules، مِنْ جهةٍ أخرى. ثُمَّ يُقحمُها جميعاً في المسارِ الافتراضيّ لموجةِ ضغطِ العملِ وشيكةِ القدومِ؛ **انظرِ الشَّكلَ (٨-A).**

تتألَّفُ الأنابيبُ المجهريَّةُ مِنْ مفرداتٍ أصغرَ، هيَ الـ β Tubulin & α Tubulin. تتحطَّمُ هذهِ الأنابيبُ المجهريَّةُ ومِنْ ثمَّ تعيدُ تركيبَ ذاتِها دائماً وأبداً وبسرعةٍ كبيرةٍ جدَّاً، على ما انتهتْ إليهِ أحدثُ الدِّراساتِ.

يعملُ التَّيَّارُ الكهربائيُّ على فكِّ ارتباطِ هذهِ المكوّناتِ، ومِنْ ثمَّ يستدعيها إلى داخلِ المسارِ المُستقبليّ المُفترضِ لموجةِ ضغطِ العملِ وشيكةِ القدومِ. فزيادةُ كثافةِ وسطِ الانتشارِ مِنَ الرَّوافعِ الهامَّةِ لسرعةِ انتشارِ الموجاتِ الطُّولانيَّةِ ومنها موجةُ ضغطِ العملِ موضعُ اهتمامنا. أخيراً، وبعدَ مرورِ الموجةِ العاملةِ وانقضاءِ الوظيفةِ، تُعيدُ هذهِ العناصرُ تجميعَ بعضِها في تنسيقٍ أنبوبيٍّ مجهريٍّ جديدٍ؛ **انظرِ الشَّكلَ (٨-B).**



A



B

الشَّكل (٨)
وظيفةُ تيَّاراتِ النَّقلِ الكهربائيَّةِ.. الأوّليّ والقياسيَّةِ
The Function of The Preliminary & The Standard Electrical Currents

يعملُ تيَّارُ النَّقلِ الكهربائيُّ الأوَّليُّ الـ Preliminary Electrical Current، وتيَّاراتُ النَّقلِ الكهربائيَّةُ القياسيَّةُ الـ Standard Electrical Currents على وجهِ الخصوصِ، كمُسرّعاتٍ لموجةِ ضغطِ العملِ الـ Action Pressure Wave. وذلك بآليَّتين اثنتين:

الشَّكل (A) أوَّلاً: تنظِّمُ تيَّاراتُ النَّقلِ الكهربائيَّةُ عناصرَ البلاسما الخلويَّةِ الـ Intracellular Elements، وترصُّها جنباً إلى جنبٍ، رافعةً بذلك كثافةَ وسطِ انتشارِ موجةِ الضَّغطِ العاملةِ. وكأنَّ كلَّ تيَّارٍ منها يهتمُّ برصفِ وتعبيدِ قطعةٍ مِنَ المَسارِ المستقبليِّ الـ Future Trajectory للموجةِ العاملةِ وشيكةِ القدومِ.
والفيزيائيُّونَ يعلمونَ ما لذلكَ مِنْ عظيمِ فعلٍ مُسرّعٍ لانتشارِ الموجاتِ الطُّولانيَّةِ خصوصاً، ومنها موجةُ ضغطِ العملِ الأساسُ في عمليَّةِ النَّقلِ العصبيِّ عبرَ اللِّيفِ العصبيِّ.

الشَّكل (B) وثانياً: تُحطِّمُ تيَّاراتُ النَّقلِ الكهربائيَّةُ الأنابيبَ المجهريَّةَ الـ Microtubules إلى مفرداتِها الأساسيَّةِ مِنْ α Tubulin & β Tubulin، ومِنْ ثُمَّ تُقحمُ العناصرَ الوليدةَ هذهِ في المسارِ المُستقبليِّ الـ Future Trajectory المُفترضِ لموجةِ ضغطِ العملِ وشيكةِ القدومِ. بعدَ مرورِ موجةِ ضغطِ العملِ، تُعيدُ هذهِ المكوّناتُ تجميعَ بعضِها للعودةِ إلى حالتِها السَّابقةِ قبلَ حالةِ الاستنفارِ الوظيفيِّ.

مُلاحظةٌ:

لمشاهدةِ فيديو قصير يشرحُ تفصيلاً وظيفةَ كمونات العملِ والتَّيَّاراتِ الكهربائيَّةِ العاملةِ في النَّقلِ العصبيّ،
انقرْ على هذا الرَّابط :

٤ ـ غمدُ النُّخاعين The Myelin Sheath

أثناءَ عمليَّةِ النَّقلِ العصبيّ، يرتفعُ الضَّغطُ داخلَ المحور العصبيّ ليبلغَ قيمةً أكبرَ ندعوها اصطلاحاً بقيمةِ ضغطِ العملِ الـ Action Pressure. تجتاحُ موجةُ ضغطِ العملِ الـ Action Pressure Wave لمعةَ اللِّيفِ العصبيّ باتِّجاهِ المشبكِ العصبيّ الانتهائيّ الـ Synapse.

يمكنُ لغشاءِ اللِّيفِ العصبيّ الـ Membrane of Neural Fiber أنْ يتحمَّلَ وحيداً قيمَ ضغطِ الرَّاحةِ المرتفعةَ أساساً. كما، وقدْ ينجحُ أثناءَ عمليَّةِ النَّقلِ العصبيّ في الثَّباتِ أمامَ أحمالٍ إضافيَّةٍ صغيرةٍ. بيدَ أنَّهُ يفشلُ حُكماً في تحمُّلِ ضغوطِ العملِ الأعلى قيمةً لزومِ النَّقلِ العصبيّ السَّريع.

تُمارسُ موجاتُ الضَّغطِ عاليةُ الطَّاقةِ فعلاً مُشوِّهاً على غشاءِ المحور العصبيّ. فيتمدَّدَ هذا الأخيرُ خارجاً، وتنتفخَ لمعتُه، وتفقدَ نتيجتَها موجةُ النَّقلِ العصبيّ زخمَها وجزءاً مِنْ سرعةِ عبورها. وهذا ما لا تقبلُهُ العضويَّةُ على عناصرها. لذلكَ خصَّصتِ العضويَّةُ المحاورَ العصبيَّةَ وحيدةَ الجدار، أيْ المحاورَ العصبيَّةَ غيرَ النُّخاعينيَّةِ الـ Unmyelinated Axons، للنَّقلِ العصبيّ صغيرِ الحمولةِ بطيءِ السَّرعةِ. وانطلقتْ تبحثُ عنْ حلولٍ تنفعُ مِنْ أجلِ نقلٍ عالي الطَّاقةِ سريعِ الانتشار.

وفعلاً، تدبَّرتِ العضويَّةُ حلَّ تلكَ النَّقيصةِ باستدعاءِ خلايا شوان الـ Schwann Cells ومنتجِها الثَّمينِ غمدِ النُّخاعين الـ Myelin Sheath. يشكِّلُ غمدُ النُّخاعين طبقةً ثانيةً تحيطُ بغشاءِ اللِّيفِ العصبيّ. غمدُ النُّخاعين، ذو البنيةِ القاسيةِ والسَّماكةِ الهامَّةِ، يرفعُ قدرةَ الجدار على تحمُّلِ قيمٍ أعلى مِنْ ضغطِ الرَّاحةِ وقيمٍ أعلى مِنْ ضغطِ العملِ. كما ويسمحُ بابتناءِ محاورَ عصبيَّةٍ أوسعَ قطراً لزومَ النَّقلِ العصبيّ السَّريع.

٥ ـ قطرُ اللِّيفِ العصبيّ وتأثيرُهُ على سرعةِ النَّقلِ العصبيّ

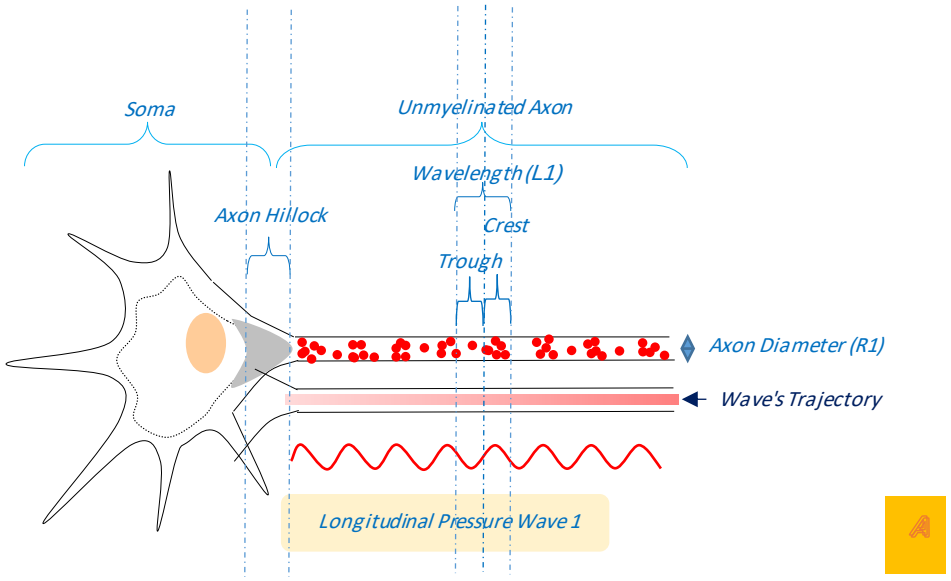
كما موجِ البحر، ينتقلُ ضغطُ العملِ على شكلِ موجةٍ طولانيَّةٍ بقيمةِ ضغطٍ أعظميَّةٍ وأخرى أصغريَّة. المسافةُ ما بينَ أعلى قيمةٍ وأصغرها تمثِّلُ سعةَ الموجةِ الـ Wave's Amplitude. كلَّما ازدادتْ سعةُ الموجةِ ازدادتْ معها طاقتُها الكامنةُ والحركيَّةُ، كما بقيَّةُ المناسيبِ الخاصَّةِ بالموجة. وبما أنَّ فضاءَ عملِ موجةِ الضَّغطِ العاملةِ هوَ الدَّاخلُ الخلويُّ، فلندرسْ أبعادَ هذا الفضاءِ وأثرَه على عمليَّةِ النَّقلِ العصبيّ.

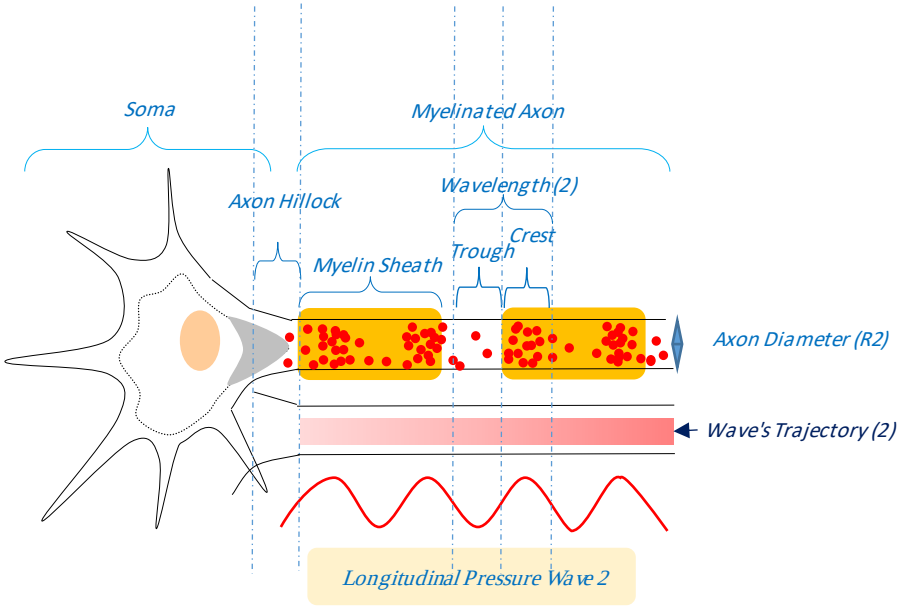
هيَ الفيزياءُ ثانيةً، تمارسُ جزيئاتُ المادَّةِ فعلاً ضاغطاً الـ Pressure Potential على جدار الوعاءِ الحافظِ لها يتناسبُ طرداً مع كميَّةِ هذهِ المادَّة. بذلكَ، يكونُ ضغطُ الرَّاحةِ الـ Resting Pressure داخلَ اللِّيفِ العصبيّ مرهوناً إذاً بقدرةِ هذا الدَّاخلِ على احتواءِ وتخزينِ عناصرِ المادَّة، أيْ مرهوناً بسعتِهِ. فمتى اتَّسعَ المحورُ العصبيُّ، ارتفعتْ قدرتُه التَّخزينيَّةُ، وارتفعَ معها ضغطُ الرَّاحةِ كما وكفاءةُ الوسطِ الدَّاخليّ في النَّقلِ العصبيّ. والنَّتيجةُ كما علمناها تعاظمٌ في سرعةِ النَّقلِ العصبيّ.

عملياً، لا يسمحُ المحورُ العصبيُّ صغيرُ القطر بالنَّقلِ العَصبيّ السَّريع، فالحدودُ واضحةٌ لا يمكنُ تجاوزُها. المتوافرُ مِنْ عناصر المادةِ في فضاءٍ محدودِ السّعةِ لا يسمحُ في حالٍ مِنَ الأحوالِ بتأسيسِ قيمٍ عاليةٍ مِنْ ضغطِ الرَّاحةِ أساساً. ولا يسمحُ بابتناءِ موجاتِ ضغطِ العملِ ذاتِ السّعاتِ والسّرعاتِ العاليةِ تالياً.

بالمقابلِ، المحاورُ العصبيَّةُ كبيرةُ القطر تسمحُ بتحقيقِ الاثنينِ معاً؛ ضغطِ راحةٍ عاليَ القيمةِ، وموجةِ ضغطِ عملٍ عاليةِ السّعةِ. ولا يخفى ما لهذَينِ العاملينِ مِنْ كبيرِ أثرٍ على سرعةِ النَّقلِ العصبيّ. وهوَ ما يفسّرُ السّرعةَ الكبيرةَ للنَّقلِ العصبيّ في المحاورِ النُّخاعينيَّةِ كبيرةِ القطر والذي أكَّدتْ عليه جميعُ الدّراساتِ المقارنةِ.

مِنْ جهةٍ أخرى، ولملءِ الفراغِ المُتذيّلِ لموجةِ الضَّغطِ العاملةِ، تسمحُ اللُّمعةُ الواسعةُ للمحورِ العصبيّ بتوافدِ كميَّةٍ أكبرَ مِنْ شاردةِ الصُّوديوم Na^+ ذاتِ الدَّورِ الأساسِ في بناءِ كمونِ العمل. بالنَّتيجةِ، قطرٌ أكبرُ للمحورِ العصبيّ يعني موجةَ عملٍ أكبرَ سعةً وكمونَاتِ عملٍ أعلى قيمةً على حدٍّ سواء؛ **انظرِ الشَّكل (٩).**





الشَّكل (٩)
العلاقةُ بينَ قطرِ المحورِ العصبيّ وسرعةِ النَّقلِ العصبيّ

طاقةُ الموجةِ (E) ⟷ طولُ الموجةِ (L) ⟷ سرعةُ الموجةِ (V)
طولُ الموجةِ (L) ⟷ ارتفاعُ الموجةِ (A) Amplitude

وكأنَّ بموجةِ ضغطِ العملِ الـ Action Pressure Wave حينَ انتشارِها مِنْ حجرةِ التَّذخيرِ الـ Axon Hillock إلى المشبكِ العصبيّ الانتهائيّ الـ Synapse، ترسمُ شكلاً أنبوبيًّا اسطوانيًّا معلَّقاً داخلَ بلاسما اللِّيفِ العصبيّ.
هذا الشَّكلُ الأنبوبيُّ ما هوَ في الحقيقةِ إلا مسارُ الموجةِ الحقيقيُّ الـ Wave's Trajectory.
طولُ المسارِ هوَ طولُ اللِّيفِ العصبيّ نفسِه، أمَّا مساحةُ مقطعِه فيتحدَّدُ بارتفاعِ الموجةِ العاملةِ.
وقدْ علمنا العلاقةَ الوثيقةَ بينَ ارتفاعِ الموجةِ وطولِها، وتالياً سرعتَها.

(راجعْ خصائصَ الموجاتِ الطُّولانيَّة)

إذاً يصبحُ جليًّا القولُ، أنَّهُ لا إمكانيةَ لإقحامِ موجةٍ طولانيَّةٍ طويلةٍ وسريعةِ الانتشارِ في ليفٍ عصبيّ صغيرِ القطر.
بكلماتٍ أخرى، لا توجدُ إمكانيةٌ لنقلٍ عصبيّ سريعٍ في ليفٍ عصبيّ صغيرِ القطر.

الشَّكلُ (A) في الألياف العصبيَّةِ غيرِ النُّخاعينيَّةِ حيثُ القطرُ الـ R1 صغيرٌ نسبيًّا: لا يسمحُ قطرُ المحورِ العصبيّ الصَّغيرُ بتمريرِ موجاتِ ضغطٍ طولانيَّةٍ عاليةِ الطَّاقةِ، طويلةِ الموجةِ، ووسيعةِ العرضِ. بالتَّالي، تكونُ سرعاتُ النَّقلِ العصبيّ فيها صغيرةً نسبيًّا.

الشَّكلُ (B) في الألياف العصبيَّةِ النُّخاعينيَّةِ الأكبرِ قطراً الـ R2: يسمحُ القطرُ الكبيرُ هذا بتمريرِ موجاتِ ضغطٍ طويلةِ الموجةِ، عاليةِ الارتفاعِ، ممَّا يعني سرعاتٍ أكبرَ في النَّقلِ العصبيّ.
إذاً، فيما خصَّ العلاقةَ بينَ قطرِ المحاورِ العصبيَّةِ وسرعاتِ النَّقلِ، تَصحُّ العلاقةُ الذِّهنيَّةُ التَّاليةُ:

$$V1 < V2 \leftarrow R1 < R2$$

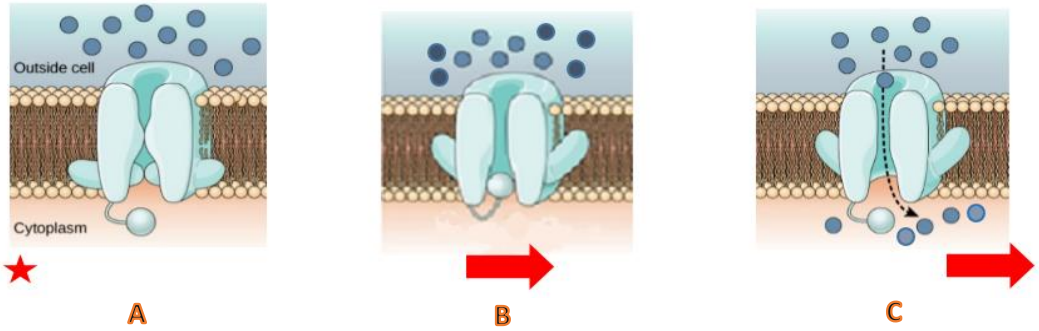
ملاحظة: الكراتُ الحمراءُ في الرَّسمِ هيَ العناصرُ داخلَ اللِّيفِ العصبيّ مِنْ بروتينات، وحويصلاتٍ، وشواردَ داخلِ خلويَّة.

٦ ـ أقنيةُ شواردِ الصُّوديوم ذاتُ الأبوابِ العاملةِ بفرقِ الضَّغط
The Pressure-Gated Na^+ Channels

كما يدلُّ اسمُها، لهذهِ الأقنيةِ بوَّاباتٌ خاصَّةٌ تتحكَّمُ بمرور شواردِ الصُّوديومِ Na^+ عبرَها. البوَّاباتُ هذهِ داخليَّةُ التَّموضعِ ومتمفصلةٌ معَ الأقنيةِ مِنْ جانبِها القريبِ مِنْ جهةِ قدومِ الإشارةِ العصبيَّةِ. في حالِ كانتِ الإشارةُ العصبيَّةُ أمراً بالحركةِ مثلاً، تهبُّ موجةُ ضغطِ العملِ مِنَ المركزِ باتِّجاهِ المحيط. عندَها، تكونُ مفاصلُ البوَّاباتِ هذهِ مركزيَّةَ التَّموضعِ.

أثناءَ النَّقلِ العصبيّ، تعملُ جبهةُ الموجةِ العاملةِ على إحكامِ إغلاقِ الأقنيةِ. بعدَها مباشرةً، يعملُ الضَّغطُ السَّلبيُّ المُتذيِّلُ للموجةِ على فتحِ مصاريعِها. لذلكَ يصحُّ أكثرَ تسميةُ هذهِ القنواتِ بالقنواتِ ذاتِ الأبوابِ العاملةِ باختلافِ قيمةِ الضَّغطِ على جانبيِّ البوَّاباتِ الـ Pressure gated Na^+ channels، وليسَ بالبوَّاباتِ العاملةِ بالكهرباءِ كما أحبَّ الآخرونَ تسميتَها.

وأيّاً تكنِ التَّسميةُ، تعملُ شاردةُ الصُّوديوم Na^+ الوافدةُ على خلقِ قطبيَّةٍ موجبةٍ الـ Positive Polarity حيثُ يجبُ، وخلقِ كمونَاتِ العملِ الـ Action Potentials تالياً.. وهذا هوَ المُهمُّ الأهمُّ؛ ***انظرِ الشَّكلَ (١٠).***



الشَّكل (١٠)
الأقنيةُ ذاتُ الأبوابِ العاملةِ بفرقِ الضَّغطِ
Pressure Gated Na^+ Channels

الشَّكل (A) التَّشريحُ الوصفيُّ: *البوَّابةُ معقَّدٌ بروتينيُّ الـ Polypeptide، ينتأُ داخلَ لمعةِ اللِّيفِ العصبيّ في البلاسما الـ Cytoplasm، ويتمفصلُ معَ الجدارِ الأقربِ لجهةِ النَّقلِ العصبيّ، أيْ معَ الجدارِ الأقربِ إلى جسمِ العصبون (النَّجمةُ الحمراءُ) في العصبوناتِ الحركيَّةِ الـ Motor Neurons.*
تتواجدُ شواردُ الصُّوديوم Na^+ بكثافةٍ في الحيِّزِ خارجِ الخليَّةِ الـ Outside Cell (الكراتُ الزَّرقاءُ).
في حالةِ الرَّاحةِ الوظيفيَّةِ،
أفترضُ قيامَ ضغطِ الرَّاحةِ بإغلاقِ البوَّاباتِ منعاً لتسرُّبِ عناصرِ البلاسما عبرَ قنواتِ العبور.

الشَّكل (B): *أثناءَ عمليَّةِ النَّقلِ العصبيّ، وحينَ وصولِ جبهةِ موجةِ ضغطِ العملِ (السَّهمُ الأحمرُ) إلى مستوى القناة، تنحنيَ البوَّابةُ باتِّجاهِ الجدارِ تحتَ تأثيرِ قيمةِ الضَّغطِ المرتفعةِ لجبهةِ موجةِ العملِ مغلقةً بذلكَ قناةَ العبور.*

الشَّكلُ (C): *وبعدَ تجاوزِ جبهةِ الموجةِ للبوَّابةِ، يعملُ الضَّغطُ سالبُ القيمةِ المتذيِّلُ لموجةِ الضَّغطِ على شفطِ البوَّابةِ نحوَ الدَّاخلِ الخلويّ، ومِنْ ثمَّ على فتحِ قناةِ العبور. كما يعملُ الضَّغطُ السَّلبيُّ ذاتُه على تدفُّقِ شاردةِ الصُّوديوم Na^+ إلى الدَّاخلِ (السَّهمُ الأسودُ النِّقطيُّ) مُعلنةً ولادةَ القطبيَّةِ الموجبةِ لكمونِ العملِ في المنطقة.*

٧ ـ الأطوارُ الثَّلاثةُ للنَّقلِ العصبيّ
The Three Phases of The Neural Conduction

تستخدمُ الخليَّةُ العصبيَّةُ التيَّاراتِ الكهربائيَّةَ مِنْ أجلِ تخطّي المسافاتِ البينيَّةَ الـ Interspaces التي تفصلُها عنْ غيرِها مِنْ عناصرَ وظيفيَّةٍ. وهذا الغيرُ قدْ يكونُ خليَّةً عصبيَّةً أخرى، وقدْ يكونُ عضواً هدفاً الـ Effector Organs. أيْ بكلماتٍ أخرى، هيَ تستخدمُ الكهرباءَ مِنْ أجلِ تجاوزِ الشَّقِّ المشبكيّ الـ Synaptic Cleft على اختلافِ أنواعِه، إذا ما أردنا الدِّقَّةَ.

بالمقابلِ، ومِنْ أجلِ نقلِ الإشارةِ العصبيَّةِ داخلَ مكوّناتِها البنيويَّةِ مِنْ محاورَ الـ Axons وتفرُّعاتٍ عصبيَّةٍ الـ Dendrites، تستعملُ العضويَّةُ موجاتِ الضَّغطِ الـ Pressure Waves دونَ غيرِها. ولهذا مُبرّراتُه المنطقيَّةُ على ما أرى. فالمسافاتُ ما بينَ موقعِ القرارِ في الدِّماغِ، والأعضاءِ الهدفِ هيَ طويلةٌ نسبيَّاً. لذلكَ كانَ أسهلَ على العضويَّةِ استعمالُ موجاتِ الضَّغطِ بدلَ التَّيَّاراتِ الكهربائيَّةِ. فالأولى أكثرُ أماناً وحفظاً لسلامةِ المُكوّناتِ البنيويَّةِ. وهيَ أسهلُ استخداماً وضبطاً مِنَ التَّيَّاراتِ الكهربائيَّةِ. كما أنَّ شروطَ عملِها أكثرُ تساهلاً مِنْ شروطِ عملِ التَّيَّاراتِ الكهربائيَّةِ.

لا تحتاجُ الخليَّةُ العصبيَّةُ لعملِ موجاتِ الضَّغطِ أكثرَ مِنْ نظامٍ أنبوبيّ مُحكمِ الإغلاقِ يحافظُ على قيمةٍ مرتفعةٍ مِنَ الضَّغطِ داخلَه. لأجلِ ذلكَ إذاً سلَّحتِ الخليَّةُ العصبيَّةُ استطالاتِها بغمدِ النُّخاعين الـ Myelin Sheath ذي المقاومةِ العاليةِ لتبدُّلاتِ الضَّغطِ داخلَها. وللغرضِ ذاتِه أيضاً، زوَّدتِ الأقنيةَ الجداريَّةَ الخاصَّةَ بنقلِ الشَّواردِ ببوَّاباتٍ داخليَّةٍ تنغلقُ تلقائيَّاً في أوقاتِ الرَّاحةِ كما حينَ العملِ حينَ تسودُ إيجابيَّةٌ في قيمةِ الضَّغطِ الدَّاخليّ. ولا تُفتحُ إلَّا عندَ اتِّجاهِ قيمةِ هذا الأخيرِ نحوَ السَّلبيَّةِ.

إذا كانتِ الحالةُ كما وصفتُ، ألا يحتاجُ ذلكَ منَّا وقفةً تأمليَّةً لمراجعةِ آليَّاتِ النَّقلِ العصبيّ الرَّاهنةِ وصولاً إلى آليَّاتِ نقلٍ جديدةٍ تكونُ أكثرَ انسجاماً مع عفويَّةِ الحياةِ وسلاسةِ منطقِها؟ فتشريحُ البنيانِ العصبيّ حقيقةٌ لا جدالَ فيها. فعينُ الآلةِ الفاحصةِ وصلتْ حدَّ الاتقانِ صورةً. بالمقابلِ، بقيتْ إرهاصاتُ الإنسانِ في توظيفِ مُخرجاتِ الكشفِ البصريّ دونَ عتبةِ الطُّموحِ وحدِّ الإقناعِ.

لمشاهدةِ عرضٍ تمثيليّ لأطوارِ النَّقلِ العصبيّ الثَّلاثةِ، انقرْ على هذا الرَّابطِ:

.....

في سياقاتٍ أخرى، أنصحُ بقراءةِ المقالاتِ التَّاليةِ:

- تصنيعُ إبهامِ اليدِ باستخدامِ الإصبعِ الثَّانيةِ للقدمِ
  Thumb Reconstruction Using Microvascular Second Toe to Thumb Transfer
- أذيَّاتُ العصبونِ المُحرّكِ العلويّ، الفيزيولوجيا المرضيَّةُ للأعراضِ والعلاماتِ السَّريريَّةِ
  Upper Motor Neuron Injuries, Pathophysiology of Symptomatology
- في الأذيَّاتِ الرَّضيَّةِ للنُّخاعِ الشَّوكيّ، خبايا الكيسِ السِّحائيّ.. كثيرُها طيّعٌ وقليلُها عصيٌّ على الإصلاحِ الجراحيّ
  Surgical Treatments of Traumatic Injuries of the Spine
- مقاربةُ العصبِ الوركيّ جراحيَّاً في النَّاحيةِ الإليويَّةِ.. المدخلُ عبرَ ألياف العضلةِ الإليويَّةِ العظمى مقابلَ المدخلِ التَّقليديّ
  Trans- Gluteal Approach of Sciatic Nerve vs. The Traditional Approaches
- النقلُ العصبيّ، بينَ مفهومٍ قاصرٍ وجديدٍ حاضرٍ
  The Neural Conduction.. Personal View vs. International View
- في النقلِ العصبي، موجاتُ الضَّغطِ العاملة Action Pressure Waves
- في النقلِ العصبي، كموناتُ العملِ Action Potentials

وظيفةُ كمونات العمل والتيّارات الكهربائيّة العاملة

في النقل العصبي، التيّاراتُ الكهربائية العاملة Action Electrical Currents

الأطوارُ الثّلاثةُ للنقل العصبيّ

المستقبلات الحسيّة، عبقريّة الخلق وجمال المخلوق

النقل في المشابك العصبيّة The Neural Conduction in the Synapses

عقدة رانفييه، ضابطة الإيقاع The Node of Ranvier, The Equalizer

وظائفُ عقدةِ رانفيه The Functions of Node of Ranvier

وظائفُ عقدةِ رانفيه، الوظيفةُ الأولى في ضبطِ معايير الموجةِ العاملةِ

وظائفُ عقدةِ رانفيه، الوظيفةُ الثّانية في ضبطِ مسار الموجةِ العاملةِ

وظائفُ عقدةِ رانفيه، الوظيفةُ الثّالثةُ في توليدِ كمونات العمل

في فقهِ الأعصابِ، الألم أولاً The Pain is First

في فقهِ الأعصابِ، الشّكلُ الضّرورة The Philosophy of Form

تخطيطُ الأعصاب الكهربائيُّ، بينَ الحقيقيّ والمَوهوم

الصدمة النخاعيّة (مفهوم جديد) The Spinal Shock (Innovated Conception)

أذيّات النخاع الشوكيّ، الأعراض والعلامات السريريّة، بحثٌ في آليات الحدوث The Spinal Injury, The Symptomatology

الرّمع Clonus

اشتدادُ المنعكس الشوكي Hyperactive Hyperreflexia

اتّساعُ باحةِ المنعكس الشوكي الاشتدادي Extended Reflex Sector

الاستجابة ثنائية الجانب للمنعكس الشوكي الاشتدادي Bilateral Responses

الاستجابةُ الحركيّةُ العديدة للمنعكس الشوكي Multiple Motor Responses

التنكّس الفالري، يهاجم المحاور العصبيّة الحركيّة للعصب المحيطي.. ويعفّ عن محاوره الحسّيّة Wallerian Degeneration, Attacks the Motor Axons of Injured Nerve and Conserves its Sensory Axons

التّنكّسُ الفالري، رؤيةٌ جديدةٌ Wallerian Degeneration (Innovated View)

التّجدُّدُ العصبيُّ، رؤيةٌ جديدةٌ Neural Regeneration (Innovated View)

المنعكساتُ الشوكيّةُ، المفاهيمُ القديمة Spinal Reflexes, Ancient Conceptions

المنعكساتُ الشّوكيّةُ، تحديثُ المفاهيم Spinal Reflexes, Innovated Conception

خُلقتِ المرأةُ من ضلع الرّجل، رائعةُ الإيحاء الفلسفيّ والمجاز العلميّ

المرأةُ تقرّرُ جنسَ وليدها، والرّجل يدّعي!

الرُّوحُ والنَّفسُ.. عَطيَّةُ خالقٍ وصَنيعةُ مخلوقٍ

خلقُ السَّماواتِ والأرضِ أكبرُ من خلقِ النَّاس.. في المرامي والدّلالات

تُفّاحة آدم وضِلعُ آدمَ، وجهان لصورةِ الإنسان.

حـــــــوّاءُ.. هذه

سفينةُ نوح، طوق نجاة لا معراجَ خلاص

المصباح الكهربائي، بين التّجريدِ والتّنفيذ رحلة ألفِ عام

هكذا تكلّم ابراهيمُ الخليل

فقهُ الحضاراتِ، بين قوَّةِ الفكرِ وفكرِ القوَّةِ

العِدَّةُ وعِلَّةُ الاختلافِ بين مُطلَّقةٍ وأرملةٍ ذواتَي عفافٍ

تعدُّدُ الزَّوجاتِ وملكُ اليمينِ.. المنسوخُ الآجلُ

الثَّقبُ الأسودُ، وفرضيَّةُ النَّجمِ السَّاقطِ

جُسيمُ بار، مفتاحُ أحجيَّةِ الخلقِ

صبيٌّ أم بنتٌ، الأمُّ تُقرِّرُ!

القدمُ الهابطةُ، حالةٌ سريريَّةٌ

خلقُ حوَّاءَ من ضلعِ آدمَ، حقيقةٌ أم أسطورةٌ؟

شللُ الضَّفيرةِ العضديَّةِ الولاديُّ Obstetrical Brachial Plexus Palsy

الأذيَّاتُ الرَّضَّيَّةُ للأعصابِ المحيطيَّةِ (١) التَّشريحُ الوصفيُّ والوظيفيُّ

الأذيَّاتُ الرَّضَّيَّةُ للأعصابِ المحيطيَّةِ (٢) تقييمُ الأذيَّةِ العصبيَّةِ

الأذيَّاتُ الرَّضَّيَّةُ للأعصابِ المحيطيَّةِ (٣) التَّدبيرُ والإصلاحُ الجراحيُّ

الأذيَّاتُ الرَّضَّيَّةُ للأعصابِ المحيطيَّةِ (٤) تصنيفُ الأذيَّةِ العصبيَّةِ

قوسُ العضلةِ الكابَّةِ المُدوَّرةِ Pronator Teres Muscle Arcade

شبيهُ رباطِ Struthers... Struthers- like Ligament

عمليَّاتُ النَّقلِ الوتريِّ في تدبيرِ شللِ العصبِ الكعبريِّ Tendon Transfers for Radial Palsy

من يُقرِّرُ جنسَ الوليدِ (مُختصرٌ)

ثالوثُ الذَّكاءِ.. زادُ مسافرٍ! الذَّكاءُ الفطريُّ، الإنسانيُّ، والاصطناعيُّ.. بحثٌ في الصِّفاتِ والمآلاتِ

المعادلاتُ الصِّفريَّةُ.. الحداثةُ، مالها وما عليها

متلازمة العصب بين العظام الخلفي Posterior Interosseous Nerve Syndrome

المُنعكسُ الشَّوكيُّ، فيزيولوجيا جديدةٌ Spinal Reflex, Innovated Physiology

المُنعكسُ الشَّوكيُّ الاشتداديُّ، في الفيزيولوجيا المرضيَّةِ Hyperreflex, Innovated Pathophysiology

المُنعكسُ الشَّوكيُّ الاشتداديُّ (١)، الفيزيولوجيا المرضيَّةُ لقوَّةِ المنعكسِ Hyperreflexia, Pathophysiology of Hyperactive Hyperreflex

المُنعكسُ الشَّوكيُّ الاشتداديُّ (٢)، الفيزيولوجيا المرضيَّةُ للاستجابةِ ثنائيَّةِ الجانبِ للمنعكسِ Hyperreflexia, Pathophysiology of Bilateral- Response Hyperreflex

المُنعكسُ الشَّوكيُّ الاشتداديُّ (٣)، الفيزيولوجيا المرضيَّةُ لاتِّساعِ ساحةِ العملِ Extended Hyperreflex, Pathophysiology

المُنعكسُ الشَّوكيُّ الاشتداديُّ (٤)، الفيزيولوجيا المرضيَّةُ للمنعكسِ عديدِ الإستجابةِ الحركيَّةِ Hyperreflexia, Pathophysiology of Multi-Response hyperreflex

الرَّمعُ (١)، الفرضيَّةُ الأولى في الفيزيولوجيا المرضيَّةِ

الرَّمعُ (٢)، الفرضيَّةُ الثَّانيةُ في الفيزيولوجيا المرضيَّةِ

خلقُ آدمَ وخلقُ حوَّاءَ، ومن ضلعِه كانت حوَّاءُ Adam & Eve, Adam's Rib

جسيمُ بار، الشَّاهدُ والبصيرةُ Barr Body, The Witness

جدليَّةُ المعنى واللَّامعنى

التَّدبيرُ الجراحيُّ لليدِ المخلبيَّةِ Surgical Treatment of Claw Hand (Brand Operation)

الانقسامُ الخلويُّ المُتساوي الـ Mitosis

المادَّةُ الصِّبغيَّةُ، الصِّبغيُّ، الجسمُ الصِّبغيُّ الـ Chromatin, Chromatid, Chromosome

المُتمِّماتُ الغذائيَّةُ الـ Nutritional Supplements، هل هي حقًّا مفيدةٌ لأجسامنا؟

الانقسام الخلويُّ المُنصِّف الـ Meiosis

فيتامين د Vitamin D، ضمانةُ الشَّبابِ الدَّائم

فيتامين ب٦ Vitamin B6، قليلُهُ مفيدٌ.. وكثيرُهُ ضارٌّ جدًّا

وَالمهنةُ.. شهيدٌ، من قصصِ البطولةِ والفداء

الثَّقبُ الأسودُ والنَّجمُ الَّذي هوى

خلقُ السَّماواتِ والأرضِ، فرضيَّةُ الكونِ السَّديميّ المُتَّصل

الجواري الكُنَّسُ الـ Circulating Sweepers

عندما ينفصِمُ المجتمعُ.. لمن تتجمَّلين هيفاءُ؟

التَّصنيعُ الذَّاتي لمفصلِ المرفق Elbow Auto- Arthroplasty

الطُّوفانُ الأخيرُ، طوفانُ بلا سفينةِ

كَشْفُ المَستُورِ.. مَعَ الاسمِ تَكونُ البِدَايةُ، فتَكونُ الهَوِيَّةُ خَاتِمةَ الحِكايةِ

مُجتمعُ الإنسان! اجتماعُ فطرة، أمِ اجتماعُ ضرورة، أم اِجتماعُ مصلحةٍ؟

عظمُ الصَّخرةِ الهوائيُّ Pneumatic Petrous

خلعٌ ولاديٌّ ثُنائيُّ الجانبِ للعصبِ الزَّنديّ Congenital Bilateral Ulnar Nerve Dislocation

حقيقتان لا تقبلُ بهُنَّ حوَّاءُ

إنتاجُ البُويضاتِ غيرِ المُلقَّحات الـ Oocytogenesis

إنتاجُ النِّطافِ الـ Spermatogenesis

أمُّ البنات، حقيقةٌ هيَ أمْ هيَ محضُ تُرَّهات؟!

أمُّ البنين! حقيقةٌ لطالما ظَننتُها من هفواتِ الأوَّلين

غَلَبةُ البنات، حوَّاءُ هذهِ تلِدُ كثيرَ بناتٍ وقليلَ بنين

غَلَبةُ البنين، حوَّاءُ هذهِ تلِدُ كثيرَ بنينَ وقليلَ بنات

ولا أنفي عنها العدلَ أحياناً! حوَّاءُ هذه يكافئُ عديدُ بنيها عديدَ بُنَيَّاتِها

المغنيزيوم بانِ للعظامِ! يدعمُ وظيفةَ الكالسيوم، ولا يطيقُ مشاركتَه

لآدمَ فعلُ التَّمكين، ولحوَّاءَ حفظُ التَّكوين!

هَذَيانُ المفاهيم (١): هَذَيانُ الاقتصاد

المغنيزيوم (٢)، معلوماتٌ لا غنى عنها

مُعالجةُ تنافرِ العضلةِ الكمثريَّةِ بحقنِ الكورتيزون (مقاربةٌ شخصيَّةٌ) Piriformis Muscle Injection (Personal Approach)

مُعالجةُ تنافرِ العضلةِ الكمثريَّةِ بحقنِ الكورتيزون (مقاربةٌ شخصيَّةٌ)(عرضٌ موسَّعٌ) Piriformis Muscle Injection (Personal Approach)

فيروسُ كورونا المُستجدُّ.. من بعدِ السُّلوكِ، عيْنُهُ على الصِّفاتِ

هَذَيانُ المفاهيم (٢): هَذَيانُ اللَّيلِ والنَّهار

كادَتِ المَرأةُ أنْ تَلِدَ أخاهَا، قولٌ صَحيحٌ لكنْ بنكهَةٍ عَربيَّة

متلازمةُ التَّعبِ المزمن Fibromyalgia

طفلُ الأنبوب، ليسَ أفضلَ المُمكن

الحُروبُ العبثيَّةُ.. عَذابٌ دائمٌ أمْ اِمتحانٌ مُستدامٌ؟

العَقلُ القيَّاسُ وَالعَقلُ المُجرّدُ.. في القِياسِ قصُورٌ، وَفي التَّجريدِ وصُولٌ

الذِّئبُ المُنفردُ، حينَ يُصبحُ التَّوحُّدُ مَفازةً لا محضَ قَرارٍ!

علاجُ الإصبعِ القافزةِ الـ Trigger Finger بحقنِ الكورتيزون موضعيًّا

وحشُ فرانكنشتاين الجديدُ.. القديمُ نكبَ الأرضَ وما يزالُ، وأمَّا الجديدُ فمنكوبُهُ أنتَ أساساً أيُّها الإنسان!

اليدُ المخلبيَّةُ، الإصلاحُ الجراحيُّ (عمليَّةُ براند) Claw Hand (Brand Operation)

سعالُ بريدٍ حقيقيُّون.. لا هواةُ ترحالٍ وهجرةٍ

فيروسُ كورونَا المُستجِدُّ (كوفيد -١٩): منْ بَعدِ السُّلوكِ، عَينُهُ عَلى الصِّفاتِ

علامة هوفمان Hoffman Sign

الأُسْطورَةُ الحَقيقَةُ الهَرِمَةُ.. شمشونُ الحكايةُ، وسيزيفُ الإنسانُ

التَّنكُّسُ الفاليري الثَّالي للأذيَّةِ العصبيَّةِ، وعمليَّةُ التَّجدُّدِ العصبيّ

التَّصلُّبُ اللُّويحيُّ المُتعدِّدُ: العلاقةُ السَّببيَّةُ، بينَ التَّيَّارِ الغلفانيّ والتَّصلُّبِ اللُّويحيّ المُتعدِّدِ؟

الورمُ الوعائيُّ في الكبدِ: الاستئصالُ الجراحيُّ الإسعافيُّ لورمٍ وعائيٍّ كبديٍّ عرطلٍ بسببِ نزفٍ داخلَ كتلةِ الورمِ

مُتلازمةُ العضلةِ الكابَّةِ المدوَّرة Pronator Teres Muscle Syndrome

أذيَّاتُ ذيلِ الفرسِ الرَّضِّيَّةُ، مقاربةٌ جراحيَّةٌ جديدةٌ Traumatic Injuries of Cauda Equina, New Surgical Approach

الشَّلَلُ الرُّباعيُّ.. موجباتٌ وأهدافُ العلاجِ الجراحيّ.. التَّطوُّراتُ التَّاليةُ للجراحة- مقارنةٌ سريريَّةٌ وشعاعيَّةٌ

تضاعفُ اليدِ والزَّندِ Ulnar Dimelia or Mirror Hand

مُتلازمةُ نفقِ الرّسغِ تنهي التزامَها بقطعٍ تامٍّ للعصبِ المتوسّط

ورمُ شوان في العصبِ الظَّنبوبيّ الـ Tibial Nerve Schwannoma

ورمُ شوان أمامَ العجُز Presacral Schwannoma

ميلانوما جلديَّةٌ خبيثةٌ Malignant Melanoma

ضمورُ إليةِ اليدِ بالجهتين، غيابٌ خلقيٌّ معزولٌ ثنائيُّ الجانب Congenital Thenar Hypoplasia

مُتلازمةُ الرَّأسِ الطَّويلِ للعضلةِ ذاتِ الرَّأسين الفخذيَّةِ The Syndrome of the Long Head of Biceps Femoris

مرضيَّاتُ الوترِ البعيدِ للعضلةِ ثنائيَّةِ الرُّؤوسِ العضديَّةِ Pathologies of Distal Tendon of Biceps Brachii Muscle

حثلٌ وذميٌّ انعكاسيٌّ Algodystrophy Syndrome تميَّزَ بظهورِ حلقةٍ جلديَّةٍ خانقةٍ عندَ الحدودِ القريبةِ للورمةِ الجلديَّةِ

تصنيعُ الفكِّ السُّفليّ باستخدامِ الشَّريحةِ الشَّظويَّةِ الحُرَّة Mandible Reconstruction Using Free Fibula Flap

انسدادُ الشَّريانِ الكعبريّ الحادِّ غيرِ الرَّضِّيّ (داءُ بيرغر)

إصابةٌ سلِّيَّةٌ معزولةٌ في العقدِ اللِّمفيَّةِ الإبطيَّةِ Isolated Axillary Tuberculous Lymphadenitis

الشَّريحةُ الشَّظويَّةُ المُوعَّاةُ في تعويضِ الضَّياعاتِ العظميَّةِ المُختلطةِ بذاتِ العظمِ والنَّقيّ Free Fibula Flap for Bone Lost Complicated with Recalcitrant Osteomyelitis

الشَّريحةُ الحُرَّةُ جانبُ الكتفِ في تعويضِ ضَياعٍ جلديٍّ هامٍّ في السَّاعدِ

الأذيَّاتُ الرَّضيَّةُ للضَّفيرةِ العضديَّةِ Injuries of Brachial Plexus

أذيَّةُ أوتارِ الكفَّةِ المُدوّرة Rotator Cuff Injury

كيسةُ القناةِ الجامعةِ Choledochal Cyst

آفاتُ الثَّديِ ما حولَ سنِّ اليأسِ.. نحوَ مُقاربةٍ أكثرَ حزماً Peri- Menopause Breast Problems

تقييمُ آفاتِ الثَّدي الشَّائعة Evaluation of Breast Problems

آفاتُ الثَّدي ما حولَ سنّ اليأس.. نحوَ مُقاربةٍ أكثرَ حسماً Peri- Menopause Breast Problems

تدبيرُ آلامِ الكتفِ: الحقنُ تحتَ الأخرم Subacromial Injection

مجمعُ البحرين.. برزخٌ ما بينَ حَياتين

ما بعدَ الموتِ وما قبلَ المَساق.. فإمَّا مَسخٌ.. وإمَّا انعتاقٌ!

تدبيرُ التهابِ اللِّفافةِ الأخمصيَّةِ المُزمن بحقنُ الكورتيزون Plantar Fasciitis, Cortisone Injection

حقن الكيسةِ المصليَّةِ الصَّدريَّةِ- لوح الكتفِ بالكورتيزون
Scapulo-Thoracic Bursitis, Cortisone Injection

فيتامين ب ١٢ .. مُختصرٌ مُفيدٌ Vitamin B12

الورمُ العظميُّ العظمانيُّ (العظمومُ العظمانيُّ)Osteoid Osteoma

(١) قصرُ أمشاطِ اليدِ Brachymetacarpia :قصرٌ ثنائيُّ الجانبِ ومتناظرٌ للأصابعِ الثلاثةِ الزّنديَّةِ

(٢) قصرُ أمشاطِ اليدِ Brachymetacarpia :قصرٌ ثنائيُّ الجانبِ ومتناظرٌ للأصابعِ الثلاثةِ الزّنديَّةِ

الكتفُ المُتجمّدة، حقنُ الكورتيزون داخلَ مفصلِ الكتف Frozen Shoulder, Intraarticular Cortisone Injection

مرفق التنس، حقن الكورتيزون Tennis Elbow, Cortisone injection

ألمُ المفصلِ العجزيّ الحرقفيّ: حقنُ الكورتيزونSacro-Iliac Joint Pain, Cortisone Injection

استئصالُ الكيسةِ المعصميَّةِ، السَّهلُ المُمتَنِعِ Ganglion Cyst Removal (Ganglionectomy)

التَّشريحُ الجراحيُّ للعصبِ المُتوسّطِ في السَّاعدِMedian Nerve Surgical Anatomy

ما قولُ العلمِ في اختلافِ العدَّةِ ما بينَ المُطلّقةِ والأرملة؟

عمليَّةُ النَّقلِ الوتريّ لاستعادةِ حركةِ الكتفِ Tendon Transfer to Restore Shoulder Movement

بفضلكِ آدمُ! استمرَّ هذا الإنسانُ.. تمكَّنَ.. تكيَّفَ.. وكانَ عروقاً متباينةً

المِبيضانِ في ركنٍ مَكينٍ.. والخِصيتانِ في كِيسٍ مَهينٍ

بحثٌ في الأسبابِ.. بحثٌ في وظيفةِ الشَّكل

تدبيرُ آلامِ الرَّقبةِ (١) استعادةُ الانحناءِ الرَّقبيّ الطّبيعيّ (القعسُ الرَّقبيُّ)Neck Pain Treatment Restoring Cervical Lordosis

نقلُ قِطعةٍ منَ العضلةِ الرَّشيقةِ لاستعادةِ الابتسامةِ بعدَ شلل الوجهِ Segmental Gracilis Muscle Transfer for Smile

أذيَّةُ الأعصابِ المحيطيَّةِ: معلوماتٌ لا غنى عنها لكلِّ العاملينَ عليهاperipheral nerves injurie

تدرُّنُ الفقراتِ.. خراجُ بوتSpine TB.. Pott's Disease

الأطوارُ الثَّلاثةُ للنَّقلِ العصبيّ..رؤيةٌ جديدةٌ

أرجوزةُ الأزَل

قالَ الإمامُ.. كمْ هوَ جميلٌ فيكمُ الصَّمتُ يا بشرُ

صِناعةُ اللَّاوَعي

أزمةُ مُثقَّفٍ.. أضاعَ الهويَّةَ تحتَ مَركومٍ من مَقروءٍ ومَسموعٍ

تُفَّاحةُ آدمَ وضِلعُ آدمَ.. وَجهان لصورةِ الإنسان

٢٠١٨/٥/١٤